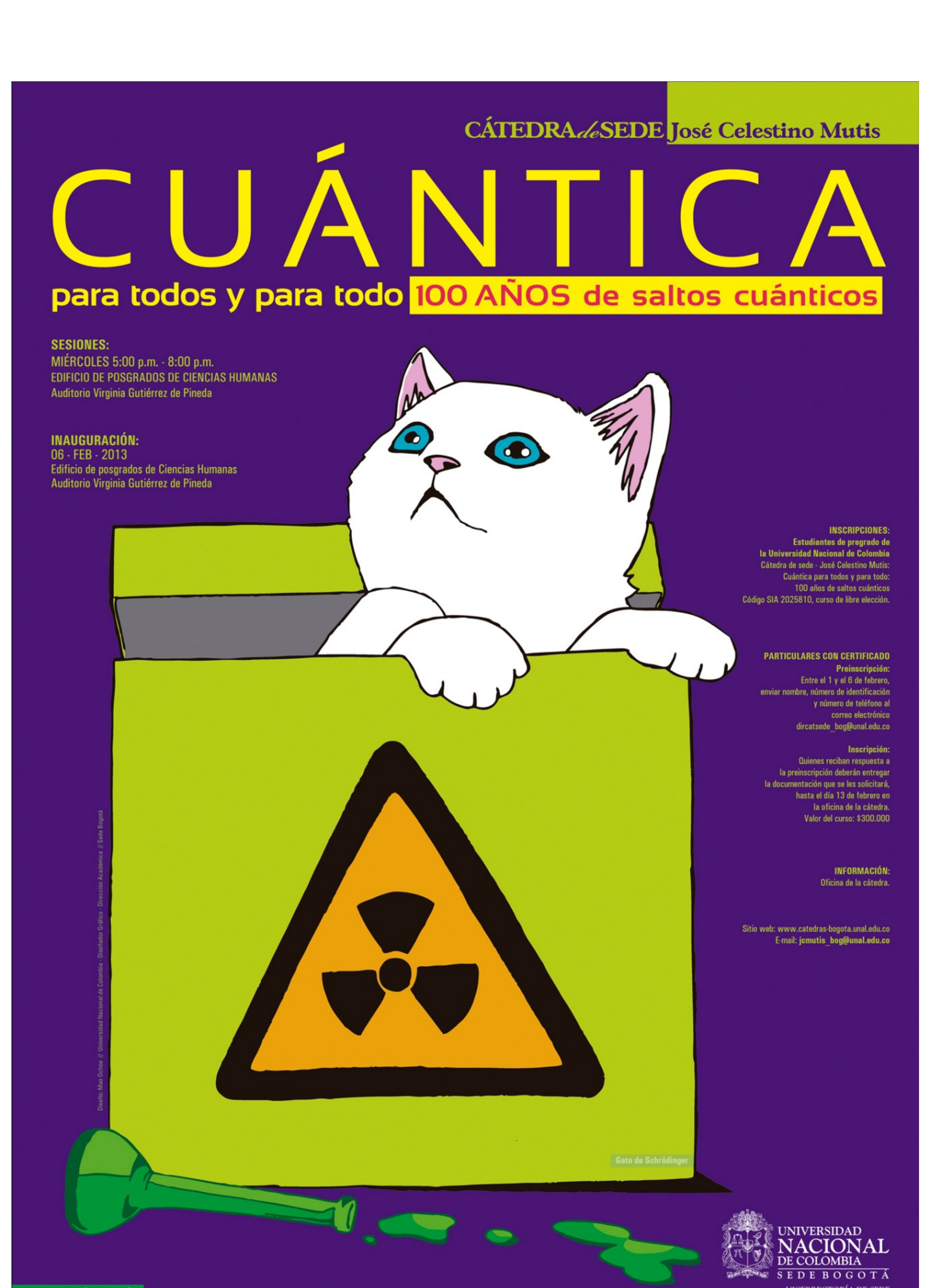
CUÁNTICA PARA TODOS Y PARA TODO:
100 AÑOS DE SALTOS CUÁNTICOS



Jairo Giraldo Gallo

MATERIAL PREPARADO ESPECIALMENTE COMO INTRODUCCIÓN A LA CÁTEDRA DE SEDE J.C. MUTIS «CUÁNTICA PARA TODOS Y PARA TODO–CIEN AÑOS DE SALTOS CUÁNTICOS»

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE BOGOTÁ – 2013 I



CÁTEDRA de SEDE José Celestino Mutis
CUÁNTICA
para todos y para todo
100 AÑOS de saltos cuánticos
SESIONES:
MIÉRCOLES 5:00 p.m. - 8:00 p.m.
EDIFICIO DE POSGRADOS DE CIENCIAS HUMANAS
Auditorio Virginia Gutiérrez de Pineda
INAUGURACIÓN:
06 - FEB - 2013
Edificio de posgrados de Ciencias Humanas
Auditorio Virginia Gutiérrez de Pineda
INSCRIPCIONES:
Estudiantes de pregrado de
la Universidad Nacional de Colombia
Cátedra de sede - José Celestino Mutis:
Cuántica para todos y para todo:
100 años de saltos cuánticos
Código SIA 2025810, curso de libre elección.
PARTICULARES CON CERTIFICADO
Preinscripción:
Entre el 1 y el 6 de febrero,
enviar nombre, número de identificación
y número de teléfono al
correo electrónico
dircatsede_bog@unal.edu.co
Inscripción:
Quienes reciban respuesta a
la preinscripción deberán entregar
la documentación que se les solicitará,
hasta el día 13 de febrero en
la oficina de la cátedra.
Valor del curso: $300.000
INFORMACIÓN:
Oficina de la cátedra.
Sitio web: www.catedras-bogota.unal.edu.co
E-mail: jcmutis_bog@unal.edu.co
Diseño: Mao Ochoa // Universidad Nacional de Colombia - Diseñador Gráfico - Dirección Académica // Sede Bogotá
Gato de Schrödinger
unradioweb
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ
VICERRECTORÍA DE SEDE
DIRECCIÓN ACADÉMICA
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



FACULTAD DE CIENCIAS – DEPARTAMENTO DE FÍSICA

CUÁNTICA

PARA TODOS Y PARA TODO:

100 AÑOS

DE SALTOS CUÁNTICOS

CÁTEDRA DE SEDE

JOSÉ CELESTINO MUTIS

PRIMER SEMESTRE DE 2013

Auditorio Virginia Gutiérrez,

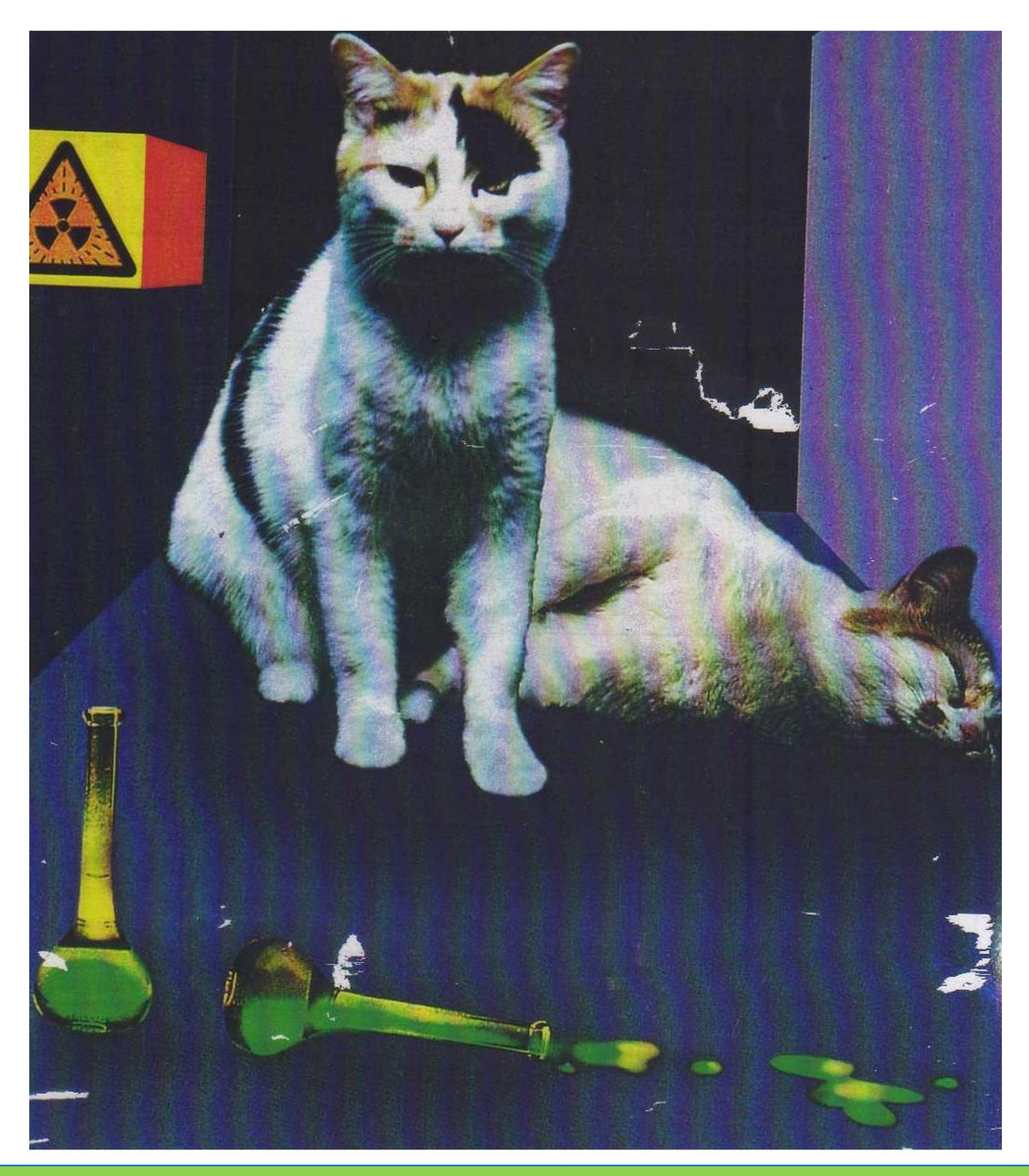
Miércoles de 5-8 p.m.

Profesores responsables: Jairo Giraldo (jjgiraldog@unal.edu.co) y KarenMilena Fonseca (kmfonsecar@unal.edu.co)

Mayor información: SIA, Sistema de Información Académica de la Universidad Nacional

Visite la página web: www.centenariobohr.fisica.unal.edu.co

LA PARADOJA DEL GATO Y LA INFORMACIÓN CUÁNTICA

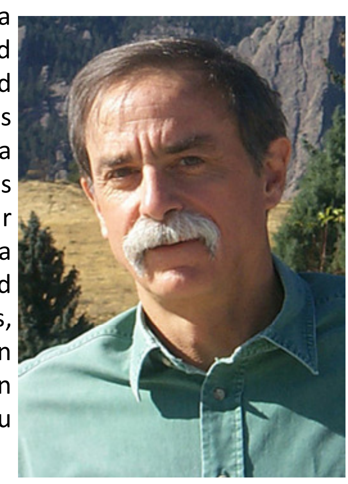


¡Se busca una gatita que, andan diciendo por ahí que le dijeron a Erwin , está viva y muerta a la vez!
Nosotros creemos que está dormida y que goza de buena salud, afortunadamente.

Se llama Quanta y encanta, no es cuento.



Serge Haroche (izquierda), de la Escuela Normal Superior (Francia), y David Wineland (derecha), de la Universidad de Colorado (Estados Unidos) a quienes se otorgó el premio Nobel en física 2012 por el desarrollo de métodos experimentales para medir y controlar sistemas cuánticos formados por una sola partícula. En síntesis, Wineland ideó trampas para átomos e iones, midiendo su estado cuántico con fotones, y Haroche hizo lo propio con trampas para fotones, midiendo su estado cuántico mediante átomos.



«Control de partículas en un mundo cuántico».

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2012/popular-physicsprize2012.pdf

Así encabeza su página la Academia Sueca con el anuncio para un público amplio del premio concedido a los destacados físicos Haroche y Wineland por su importante contribución para la detección y manipulación de partículas individuales que se comportan cuánticamente. (Ellos) "han abierto la puerta a una nueva era de experimentación con física cuántica, demostrando la observación directa de sistemas cuánticos individuales sin destruirlos", son los "primeros pasos hacia la construcción de computadores ultra rápidos basados en la física cuántica".

«DEL ÁBACO AL COMPUTADOR CUÁNTICO»

Este fue el título de una nota periodística publicada en el diario **EL TIEMPO** hace una docena de años (18/12/2000). Hoy la computación cuántica está *ad portas*. Los autores de la nota (Giraldo y Fonseca) propusimos como **Cátedra de Sede José Celestino Mutis** para el 2013 I una extensión del curso de contexto «Cuántica para todos y para todo», con el subtítulo **«Cien años de saltos cuánticos»**, propuesta que fue acogida favorablemente por el Consejo de Sede de la Sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia en su sesión del 7 de diciembre de 2012. Uno de los argumentos que esgrimimos da lugar al subtítulo sugerido: fue en el artículo de Bohr, escrito entre marzo y abril de 1913, al que siguieron otros 2 del mismo autor, donde por primera vez se esbozó la idea de los estados estacionarios y del paso de uno a otro en forma de saltos discontinuos. Cien años después la teoría es a la vez consistente e *ininteligible* dentro de la lógica clásica.

La cátedra se propone hacer llegar a un amplio público las ideas centrales que hay detrás de las nuevas tecnologías (siglo XXI) y las que se desarrollaron principalmente a partir de la segunda mitad del siglo pasado, con fundamento en la física cuántica. Los conceptos que subyacen en física, química y biología cuánticas, la discusión de esos conceptos (y su desfiguración por parte de quienes no los entienden), la computación cuántica, el procesamiento cuántico de la información y otros temas de actualidad, serán temas centrales de la cátedra. Los estados cuánticos de partículas aisladas, hoy en día preparados en el laboratorio, ocuparán una buena proporción de ella.

CONTENIDO

UNA NUEVA GUÍA PARA PERPLEJOS

Presentación de *Unos cuantos para todo*.

Moisés Maimónides (1135-1204) fue un filósofo, matemático y físico hispanojudío, conocido muy poco en nuestro medio, pero célebre por ser uno de los tempranísimos iniciadores de la cultura moderna en sus albores medievales. Maimónides vivió en una auténtica encrucijada, ya no de un *trivium* o de una tríada (cruce de tres caminos), sino de un *quadrivium* (cuatro vías): por tres caminos enfrentados pero complementarios en el tronco, las religiones de los libros: la hebraica que era la de Maimónides, la islámica encarnada en su amigo y maestro Averroes, y la católica de la España en trance de reconquista en la natal Córdoba, entonces la ciudad más grande de Europa, dominada por los árabes, en un principio tolerantes; por otro camino afluía el pensamiento aristotélico rescatado y reinterpretado por Avicena y Averroes.

Un encuentro de esta naturaleza significaba una suerte de cataclismo para el pensamiento y para las creencias. Maimónides se podría considerar como un temprano ladino: en el momento en el cual emergía el castellano como romance o lengua del amor, desprendiéndose del latín, alimentado por el cruce lingüístico con el hebreo y el árabe, él era un hombre inserto en el diálogo de muchas fronteras culturales. Maimónides resolvió la tremenda complejidad de su tiempo en el libro *Una Guía para Perplejos*, en el cual avanzó en la interpretación hermenéutica al distinguir entre lenguaje literal y figurado y, lo más importante, introdujo cierto equivalente de la duda metódica y de lo que hoy se llama reflexividad: duda de la creencia, duda de la ciencia, duda de la relación entre ciencia y creencia y duda del pensador que duda. Su libro es además uno de los mayores regalos que una maestro haya hecho en todos los tiempos a un discípulo, a quien lo dedica.

Siete siglos después, dos pensadores norteamericanos se hallaron ante otra viacrucis intelectual y vital. Henry Adams (1838-1918) y Charles Sanders Peirce (1839-1914) poseían un capital cultural valiosísimo: el bisabuelo de Adams fue el segundo presidente de los Estados Unidos, su abuelo el quinto, su padre embajador por el norte ante Gran Bretaña durante la guerra de secesión. El padre de Peirce fue a su vez profesor de astronomía y de matemáticas de la Universidad de Harvard y pionero en la organización de academias de ciencia. Ambos gozaron de una educación privilegiada, de niños y jóvenes en las bibliotecas de sus padres, luego el primero derecho y el segundo química en la Universidad de Harvard. Adams estudió además en la Universidad de Berlín, la misma que había sido reformada por Guillermo de Humboldt para integrar en la academia la docencia y la investigación. Ambos empero pensaban que la educación de su tiempo era decepcionante y requería de reformas fundamentales.

Uno y otro experimentaron el gran sacudimiento que se produjo entre la primera y la segunda revolución tecnológica, la industrial y la eléctrica, pero más aún, fueron retados por unas

contradicciones mucho más profundas que aquellas que sorteara Maimónides. El modelo de la física de Newton se demostraba ya limitado con el desplazamiento del interés por la mecánica y la gravitación, ahora por la segunda ley de la termodinámica y su ley de entropía que argumentaban la disipación de la energía y la irreversibilidad del tiempo, contrario al modelo eterno de Newton, a su determinismo y a su visión de un universo en el cual la energía no constituía problema, porque se la consideraba constante.

Pero, además, por otra vía aparecía el paradigma de Darwin que, sin entrar en los retos teológicos, expresaba una visión contraria a la de la degradación de energía por la organización creciente de organismos primarios hasta la alta complejidad del ser humano.

Para responder a esta perplejidad, Adams escribió dos libros fundamentales: el más conocido es *La Educación de Henry Adams*, exaltado por la Modern Library como el mejor libro de no ficción escrito en inglés en el siglo XX, paralelo al Ulises de Joyce en la ficción. Otro librillo, menos conocido, pero no menos importante, es *A Letter to american teachers of history*. Destinado a que la comunidad académica de científicos sociales, pero también naturales, discutieran las implicaciones de estos dos paradigmas para tender puentes, el asunto fracasó por tremenda incomprensión.

Semejante incomprensión o quizás peor experimentó Charles Sander Peirce. Vetado el ingreso a la academia por las torpes razones puritanas que exiliaron por mucho tiempo a Poe de la comprensión norteamericana, el genial pensador que seguía las huellas de las polémicas entre nominalistas y realistas medievales y los rastros de Leibniz, Schiller, Hegel, realizó una obra prodigiosa en su descubrimiento de la semiótica, aplicada con enorme creatividad al conjunto de ciencias, saberes y artes, en la dirección del pensamiento complejo que se impondrá sólo desde hace medio siglo, cuando más.

Hoy estamos ante encrucijadas más laberínticas que las de Maimónides y más tupidas que las afrontadas por los dos pioneros norteamericanos del pensamiento complejo. Transitamos no ya por la tercera revolución, la electrónica, sino por una inédita, la digital. El saber crece en magnitud exponencial, lo mismo que los entronques entre disciplinas antes separadas. No obstante, nuestra ignorancia se ha tornado infinita. Una ventaja es que sabemos de modo aproximado cuánto ignoramos: se dice que la energía y la materia oscura del universo superan la tercera parte de lo que apenas conocemos. Otra ventaja, empero, de esta ignorancia es que existen caminos para resolverla. La física cuántica es uno de ellos. De ello forma parte la nanología, este saber complejo de las más pequeñas cosas, infinitesimales. La misma nanología sitúa en el horizonte quizás no más distante de dos décadas la invención de un computador cuántico que según me indica Jairo Giraldo Gallo, estaría en condición de almacenar todas las bibliotecas del mundo en algo menos que una falange de la mano. El paradigma cibernético nos enseñó que la evolución es la transformación de energías en información. También nos indicó que el uso de esta información es el control. Quizás una ecuación aún más compleja y grata sería indicar que la dirección es la transformación de energías en información y en sabiduría, algo más allá del control. Pero para ello será necesario que las ciencias sociales se pongan a tono con los progresos de las

ciencias naturales y de las tecnologías, con la elaboración de unos saberes más dúctiles y abiertos, menos dominados por visiones apocalípticas y nostálgicas. Edgar Morin nos señala allí un camino apropiado, de inmensa creatividad.

Por ello hay que agradecer a Buinama y a su presidente, Jairo Giraldo Gallo, la elaboración de esta contemporánea *Guía para Perplejos*, este mapa de las transformaciones profundas que ocurren en las ciencias naturales. Tanto más cuanto en esta bitácora se reúnen, como en Buinaima, el saber de frontera con el empeño pedagógico, ambos expresión de una inmensa confianza en la apropiación de la ciencia por los colombianos y partiendo de incorporar el *humus* de Colombia, sus mitologías indígenas, lo mismo que ese fascinante despliegue estético que nos caracteriza como aventajados ladinos.

La palabra ladino recibe en el diccionario dos acepciones opuestas, configurando una suerte de oxímoron: tonto y astuto. La versión del ladino como tonto es la de un mimetismo camaleónico, signado por el refrán: “si vas a Roma, haz lo que vieres”. El significado de astuto revela al ladino como ser calculador en la frontera, una especie de Odiseo o de Hermes midiendo fuerzas para ganar ventaja o en la versión criolla son el “vivo” o el “avivato”, frente al ladino como tonto o “bobo”. Pero existe en el oxímoron una terceridad que se podría derivar de la sutileza de Peirce: el ladino como sabio por su capacidad de múltiples traducciones: de lo local a lo global y de lo universal a la aldea; de los saberes científicos y tecnológicos a las humanidades y a las artes; de las ciencias, artes y humanidades a la educación y a la producción.

Jairo Giraldo Gallo encarna como suerte de arquetipo esta ductilidad y creatividad para religar. Fue de hecho ya muy significativo que la Misión de Ciencia y Tecnología se denominara popularmente “Misión de los sabios”. Quizás con una aplicación seria y constante en hacer ciencia y divulgarla, podamos algún día transformar a “bobos” y “vivos” en ciudadanos, para dejar la patria boba en la cual todavía nos hallamos como en noche oscura.

Gabriel Restrepo

Bogotá, Julio 31 de 2009

Post scriptum de J. Giraldo:

Con enorme agrado y gratitud he querido conservar la presentación que Gabriel Restrepo hiciera a la versión preliminar de estas notas, denominadas *Unos cuantos para todo*. Tardíamente me enteré que un ensayo del famoso economista Ernest Friedrich Schumacher, más conocido por *Small is beautiful*, se titula *A guide for the perplexed* (1977), haciendo alusión al citado libro de Maimónides. Más relacionado con el nuestro es el de Jim Al-Khalili (2003), *Quantum, a guide for the perplexed*. (Recomiendo ver una reciente conferencia de este autor sobre biología cuántica: http://physicsdatabase.com/2013/02/14/when-quantum-physics-meets-biology/, uno de los temas centrales de la cátedra.)

Introducción a los

«misteriosos saltos cuánticos»

0.1 Un centenario memorable

En julio de 1913 se publicó en el *Philosophical Magazine* (Londres) un artículo que causó revuelo en la comunidad científica: **«Sobre la constitución de átomos y moléculas»**. Su autor, Niels Bohr, había llegado como *postdoc* a Cambridge en 1911. El jefe del laboratorio era Joseph J. Thomson, quien había sido acreedor al premio Nobel en física 1906 por su descubrimiento del electrón. Precisamente al estudio de los electrones estaba dedicada la tesis doctoral del joven Bohr en Copenhague. La relación entre los dos no fue muy buena, por lo que Bohr prefirió mudarse a Manchester, bajo la supervisión de un ex alumno de Thomson, Ernest Rutherford, galardonado con el Nobel en química en 1908 por sus pioneros resultados sobre sustancias radiactivas. Rutherford y sus colaboradores recién habían descubierto el núcleo atómico. El artículo fue recibido con gran escepticismo por los más prominentes físicos del momento. No era para menos: recurría a *cuantos* de radiación, a *cambios discontinuos* de energía. Recuérdese que la idea de los *granos de energía* (fotones), constituyentes básicos de la luz, sugeridos en 1905 por Albert Einstein, no era todavía aceptada. Max Planck, uno de los *grandes* del momento, había expuesto una idea similar a la de Einstein en 1900, pero menos atrevida. De hecho, Planck asumía, a diferencia de Einstein, que la idea del *quantum* sería provisoria.

Llama la atención que el artículo haya sido presentado a la prestigiosa revista precisamente por el profesor Rutherford, cuyo modelo atómico era en gran medida desmoronado por el principiante Bohr. Tampoco el modelo de Thomson salía bien librado. La conclusión del extenso artículo era obvia: las órbitas de los electrones en los átomos están cuantizadas, es decir, el electrón salta de un nivel o valor de energía a otro sin pasar por valores intermedios. Para ello, toma o libera esos *granos de luz* propuestos por Einstein, y lo hace únicamente si el valor es el adecuado. A pesar del rechazo que entre los grandes de la física del momento causó tan descabellada idea, desde entonces *los cuantos* o paquetes discretos de materia y de energía son *la esencia* de la física de vanguardia. Los intentos por liberarse de la idea de *los malditos saltos cuánticos*, supuestamente pasajera, han resultado inútiles. No así los experimentos que refuerzan la validez de sus principios y los que muestran su aplicabilidad en todos los campos. Puede pues afirmarse que su propuesta abrió un camino de no retorno hacia la nueva física del átomo y sus ingredientes y a la relación estrecha entre materia y radiación, o de manera más general, entre materia, energía e información.

Efectivamente, los *saltos cuánticos* nos han llevado mucho más lejos de lo que pudo imaginar Bohr en 1913. Su modelo mezclaba ideas clásicas y cuánticas; las primeras, entre ellas el concepto mismo de órbita para el electrón, serían modificadas en la década siguiente. La propuesta de de Broglie, 10 años después del *modelo de Bohr*, de que habría una onda *piloto* asociada a la trayectoria del electrón también; el mismo concepto de *trayectoria* desaparecería de la física, a pesar de los intentos de Schrödinger por *salvar las apariencias*. El mismo Bohr y otros, entre ellos

Born, Heisenberg, Pauli, Dirac y Jordan, por mencionar solo algunos, llevarían esas discontinuidades mucho más allá de lo que cabría imaginar en aquella época.

Hoy se habla persistentemente de la computación cuántica, en términos generales del procesamiento cuántico de la información, y se nos dice que estamos en el *amanecer* de la Biología Cuántica. La fotosíntesis, absorción de cuantos de luz para convertir esos *granos de energía* en energía química, proceso utilizado primero por cianobacterias y probablemente otros seres vivos primitivos, posteriormente emulado por las plantas, es un fenómeno en principio cuántico. Desde que surgió el concepto cuántico de *nube electrónica*, quedó claro que la química es cuántica en su base fundamental: la estructura electrónica de átomos y moléculas es explicada consistentemente como estados propios de energía y momentum angular de los electrones, mientras que su modificación o evolución está determinada por la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo, lo que explica tan satisfactoriamente como se desee, mediante cálculos de primeros principios y *ab initio*, el origen y la dinámica de las reacciones químicas o moleculares. El estudio de esa estructura, superpuesta a la cristalina (también cuántica en su dinámica), es el *abc* de la Física del Estado Sólido. La explicación básica de las propiedades de la materia y la energía está, pues, en la física cuántica en cualquiera de sus presentaciones: la versión de onda de Schrödinger, la matricial de Heisenberg, la de los múltiples caminos de Feynman o cualquiera de las otras formulaciones equivalentes.

Podría afirmar entonces que física, química y biología tienen una base común cuántica, aunque el aislamiento de fenómenos puramente cuánticos en seres vivos es todavía controvertible. También la astronomía requiere de esa herramienta, por supuesto: las reacciones nucleares que explican la evolución estelar son obra de la *mecánica* que subyace en el mundo cuántico, tan radicalmente distinta a la otra mecánica, «el mecanismo de relojería» imaginado por Galileo y Newton. ¿Qué sería de la astrofísica y la cosmología sin la física cuántica? El origen del Universo no tiene explicación clásica. Sobra advertir que los instrumentos que se utilizan y se utilizarán para el avance de las ciencias todas y para sus aplicaciones serían impensables sin la nueva física. La miniaturización de los dispositivos optoelectrónicos, su uso en la informática y las comunicaciones, en la nano- y telemedicina son cada vez más amplias.

Pero **«la visión cuántica del mundo»** da para mucho más, incluso para ciertos *cuentos cuánticos*. Este es uno de los asuntos que queremos abordar en la versión 2013 I de la ya tradicional «Cátedra José Celestino Mutis» que imparte la Sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia. Más específicamente, las posibles interpretaciones así como las extrapolaciones indebidas serán tema de discusión. Indudablemente lo serán las tecnologías a que dará lugar, al igual que todas aquellas que se sustentan desde hace más de medio siglo en los *chips* de silicio o de cualquier otro semiconductor.

Física cuántica o «Teoría Cuántica» es el nombre con el cual se reconoce genéricamente la nueva teoría, ya centenaria, que vino a relevar los 2 grandes pilares de la física clásica: «Philosophiæ naturalis principia mathematica» de Newton y «A treatise on electricity and magnetism» de Maxwell. Estas son, salvo por la incorporación primero de la relatividad especial y luego de la teoría general de la relatividad, debidas ambas a Einstein, siendo la última de aplicación a nivel

cosmológico, las dos grandes teorías o los pilares fundamentales en la descripción de los fenómenos macroscópicos y en modo alguno pierden validez. Pero a pesar de su comprobado éxito en la explicación y el uso o tratamiento de la mayor parte de esos fenómenos, su fracaso, no tanto en el formalismo matemático sino en lo que es peor aún, en la extrapolación de los conceptos básicos que le sirven de fundamento, es evidente a la hora de aplicar esos conceptos deterministas al denominado microcosmos. Aquella, por el contrario, no es solo la teoría científica más consistente hasta el momento, sino también la más precisa. Su versión relativista (término que explicaremos más adelante) da lugar a la electrodinámica cuántica y arroja resultados tan espectaculares como el de la predicción del momento magnético del electrón, resultado concordante con los experimentos con una exactitud insuperable: si se midiese la distancia de Los Ángeles a Nueva York con semejante exactitud (lo cual es imposible por razones obvias que superan la posibilidad de mejorar la precisión en los aparatos de medida), el valor diferiría del correcto en el espesor de un cabello humano.

Cuando Bohr propuso hace un siglo que el electrón en el átomo evoluciona como supuso que lo hace, tuvo que romper con la teoría física en términos matemáticos mejor construida hasta el momento: la electrodinámica clásica, también llamada *electromagnetismo*. Maxwell había logrado unificar los fenómenos eléctricos y magnéticos y elaborar la primera teoría consistente para la luz y para la interacción de la materia con la radiación, al demostrar que la luz visible no es más que una mínima parte del amplísimo *espectro de radiación de energía* de las ondas electromagnéticas. Pero Bohr tuvo que romper también, por supuesto, con la hasta entonces incontrovertible mecánica newtoniana. Es más, estaba rompiendo también con la corrección que a esa teoría hiciera el mismísimo Einstein. Este último refinó las dos teorías clásicas de la física: no rompió con ellas. Por eso no es extraño que los físicos de entonces no le prestaran mayor atención a *los saltos* introducidos por Bohr. Ello, a pesar de que en aquel momento estuviera mezclando las ideas cuánticas con las clásicas. El paso de una a otra órbita, si bien reconocía trayectorias permitidas, consistentes con la segunda ley de Newton, era absurdo desde el punto de vista del determinismo clásico introducido por este. El salto se daba, además, de manera instantánea, violando el principio de velocidad máxima de propagación de las señales debido a Einstein.

El sentido común decía, como lo proclamó Einstein 14 años más tarde, cuando se develó el giro fundamental en la concepción física que esa forma de pensar entraña y se impuso la «Interpretación de Copenhague», que esos azarosos saltos cuánticos, absurdamente discontinuos, no podían ser correctos. Pero lo que revelan los más finos y sutiles experimentos del presente es todo lo contrario: se afirma la validez de los *misteriosos saltos cuánticos*.

0.2 La segunda revolución cuántica

Lo que se iniciara con Planck y Einstein para continuar con Bohr y Sommerfeld en la década siguiente suele denominarse Física Moderna, término seguramente inadecuado si se tiene en cuenta que la ciencia moderna se inició con Bacon y Galileo. Lo que aconteció después, a finales de la tercera década del siglo XX, para continuar en los treinta y en las décadas siguientes, el desarrollo del formalismo que, si bien no entraña principios nuevos sí ha encontrado expresiones más consistentes, se denomina en general mecánica cuántica, elemental o avanzada según el caso.

La electrodinámica cuántica, tempranamente desarrollada, y la óptica cuántica, mucho más reciente, forman parte de la avanzada. La teoría cuántica de campos también.

Así pues, la mecánica cuántica en su conjunto, nombre a mi modo de ver obsoleto para el presente siglo, es la única teoría física capaz de darnos explicaciones cuantitativas y detalladas sobre el comportamiento de la materia, la energía y la información a nivel fundamental o elemental, básico o microscópico, como suele denominarse. Si todo está hecho de los mismos ingredientes básicos, como supondremos, se espera que finalmente ella sea capaz de predecir el comportamiento de los objetos en otras escalas, a saber: a) el de la materia-radiación de todo tipo en el espacio-tiempo a escala o nivel cósmico, la que corresponde al Universo en su conjunto; b) el de la masa-energía organizada en la escala macroscópica, es decir, aquella de la que estamos hechos, la emparentada con nuestras percepciones sensoriales; c) el de los organismos vivos en toda su complejidad, desde los más elementales como los virus y los procariotas o protocélulas, hasta los más complejos, incluido el ser humano y las sociedades de todo tipo. En otros términos, ella debería podernos explicar el origen del Universo, de la vida y de la inteligencia; debería explicarnos el funcionamiento de todo, de los sistemas, entre otros los neuronales, y los procesos, incluidos los mentales; debería servir para el procesamiento de la información en todas sus formas, entre otras aquella de la que tenemos experiencia subjetiva, la que se procesa en el cerebro humano, incluida la que da lugar a la *conciencia* en cualquiera de sus múltiples acepciones.

Desafortunadamente el paso de uno a otro nivel, de una a otra estructura o de un sistema a otro no es así de simple. Para empezar, la otra gran teoría, relatividad general o «Teoría General de Gravitación», no encaja dentro del esquema de la primera. Esa conclusión no solo es sorprendente sino también contradictoria, sobre todo si se tiene en cuenta que muchos de los fenómenos colectivos que se dan a nivel macroscópico, la condensación de Bose-Einstein, la superconductividad y el magnetismo por mencionar unos pocos ejemplos bien conocidos, son manifestaciones de las propiedades cuánticas de la materia. Lo ocurrido durante el *big bang* ('gran explosión') y en la etapa denominada *inflacionaria* no podría entenderse sin recurrir a la fenomenología cuántica; tampoco el comportamiento de los agujeros negros. Para imaginar siquiera cuál será el final del Universo (actual) necesitamos afinar los modelos actuales (cuánticos, por supuesto) de la gravitación, requerimos de una teoría unificada satisfactoria. Incluso a un nivel más básico, explicar adecuadamente, desde el punto de vista fenomenológico y cuantitativo, la conducción de calor, entendido éste como energía, *flujo del calórico*, para usar una expresión en boga hasta hace apenas 150 años, exige un tratamiento cuántico; lo mismo puede afirmarse para la conducción de electricidad o *flujo eléctrico* y para otros, supuestamente sencillos, fenómenos cotidianos. Ello sin hacer referencia a los líquidos cuánticos y a otros sistemas puramente cuánticos. Más complejo es, por supuesto, el fenómeno de la vida, un proceso típicamente por fuera del equilibrio termodinámico. En estos terrenos, iniciados también con conceptos puramente clásicos, hay aún mucho camino por explorar en el terreno de la fenomenología cuántica.

Si el procesamiento clásico de la información está todavía en pañales, ¿qué podremos decir de su tratamiento cuántico? Tremendamente complejo es el paso de los procesos atómicos y

moleculares a los microscópicos que se originan en los organismos vivos, incluyendo los virus, a pesar de que nadie hoy suficientemente bien informado recurrirá a expresiones de antaño como *flujo vital*. ¿Qué decir de los procesos que surgen en sistemas neuronales? Establecer el conectoma (véase pg.xxx) de un cerebro tan aparentemente sencillo como el de un mosquito, con apenas 100,000 neuronas, es por ahora una quimera. Pero por complicados que sean, se ha avanzado bastante y se aspira a entender cada vez mejor esos sistemas desde un punto de vista que podríamos denominar *clásico*. Me atrevo a afirmar que jamás entenderemos el funcionamiento del cerebro con esos esquemas deterministas. Algunos especulan que en los procesos neuronales hay fenomenología cuántica más allá de la que es obvia en, por ejemplo, los enlaces sinápticos elementales, de origen electroquímico. Está por fuera del interés de este ensayo pedagógico ahondar en esas especulaciones, pero se espera que surjan debates alrededor del tema durante el desarrollo de la cátedra.

El propósito del presente *prólogo cuántico*, escrito con el ánimo de servir de fundamento a la Cátedra José Celestino Mutis en su versión 2013 I, no es, en modo alguno, hacer claridad sobre el aún oscuro origen de la conciencia, ni siquiera de la vida; tampoco lo es señalar las diferencias (¿contradicciones?) entre esas dos grandes teorías del siglo XX, la cuántica y la relativista, la primera de las cuales debe a Einstein más de lo que usualmente se menciona; la segunda fue, por mucho tiempo, obra exclusiva del gran genio. Einstein murió frustrado, hasta cierto punto, al no poder darse por satisfecho con lo que él mismo inició y le condujo al premio Nobel (no fue, como podrían suponer algunos, su teoría de relatividad), negándose a aceptar las consecuencias epistemológicas y ontológicas de las contribuciones que él mismo hizo a *los quanta*. «Dios no juega a los dados», le espetó a Bohr. «Deja de decir a Dios lo que tiene que hacer», dicen que le respondió éste. Pero Einstein no podía darse por satisfecho con semejante respuesta. No es para menos, como se sugiere a continuación.

La frase lapidaria de uno de los grandes físicos del pasado siglo, Richard Feynman, *nadie entiende la mecánica cuántica*, sigue siendo *el gran reto*. Eso quiere decir, en otras palabras, que al menos por ahora son permitidas diversas interpretaciones, siendo las predicciones exactamente las mismas en cualquier esquema de pensamiento consistente con sus principios, ellos sí perfectamente establecidos desde hace cerca de 90 años. Entre las predicciones está el entrelazamiento cuántico, verificado en múltiples ocasiones, particularmente desde 1982 con el famoso experimento de Alan Aspect, asunto al cual se referirán varios conferencistas durante la cátedra. Esta conclusión, la de las *acciones fantasmales a distancia*, resultó inaceptable para Einstein, quien exigía una interpretación de la realidad acorde con caros principios clásicos, ratificados por su teoría de relatividad, entre ellos el de la relación causa-efecto. El mismo Schrödinger, quien con Heisenberg comparte el mérito de gestor principal de la teoría cuántica, declaró que lamentaba haber tenido que ver con el asunto; de ahí su famosa paradoja del gato. Louis de Broglie, responsable de la *dualidad onda corpúsculo* con su *onda piloto* ('ondas de materia'), fue uno de los opositores a la interpretación de Copenhague, diseñada principalmente por Bohr y Heisenberg. La incomodidad la compartieron David Bohm y otros *famosos*, quienes difirieron de aquella y otras interpretaciones *misteriosas*. Eso en cuanto a las interpretaciones. En

las mediciones u *observables* y en las predicciones, todos los formalismos cuánticos, que son varios, coinciden.

En cambio las aplicaciones de la no por centenaria menos revolucionaria teoría son cada vez más amplias, de ahí el título del curso que precedió a la cátedra que ofrecemos y se trasladó a ella: *Cuántica para todos y para todo*. También el subtítulo, inspirado en el memorable centenario: *Cien años de saltos cuánticos*. El otorgamiento reciente del premio Nobel a Serge Haroche y David Wineland es prueba del creciente dinamismo en el campo cuántico. La *Nanotecnociencia*, a la cual nos referiremos más adelante, es otro claro ejemplo. La criptografía cuántica, el teletransporte (no me gusta el término teleportación) cuántico, la computación cuántica y muchas otras aplicaciones impensables hasta hace poco pueden denominarse, con razón, *la segunda revolución cuántica*, aceptando que la primera fue la que condujo a la formulación consistente de sus principios. Empezamos a entender y procesar mejor la *información cuántica*, prerrequisito para las aplicaciones más impactantes o esperadas (algunas más resultarán inesperadas) de la segunda revolución. Estamos en los albores, lo dice un número cada vez mayor de investigadores, de la biología cuántica. ¿Nos llevarán esos avances a una mayor comprensión de la conciencia y de los diversos procesos que ocurren en el cerebro? Hoy se habla de la econofisica y de la sociofisica, con modelos surgidos del formalismo cuántico. ¿Nos estamos acercando a la tercera cultura propuesta por Snow? ¿Podremos enderezar el rumbo que ha tomado la *civilización occidental*?

Permítaseme una última especulación: si se me preguntara qué cantidad física (una sola) nos permitiría caracterizar mejor cada uno de los tres últimos siglos, respondería que la materia es el emblema del siglo XIX (hipótesis atómica), la energía lo es del siglo XX (materializada atrozmente en la denominada *bomba atómica*) y la información, la del presente siglo (por algo suelen denominar a la actual, aunque no sepan el por qué, *era de la información* o de la informática). No todos están de acuerdo en que la información es algo físico. Lo que sí parece claro es que la información es el inverso de la entropía, o más rigurosamente: organización e información van de la mano. Un apéndice a estas notas, escrito por Karen Fonseca, está destinado a suministrar al lector algunos rudimentos sobre el *procesamiento cuántico de la información*, tema al que se volverá reiteradamente durante la cátedra.

Hay algo de lo que no cabe duda alguna: no estamos en condiciones, con nuestra lógica convencional, de entender el extraño comportamiento de los ingredientes cuánticos del Universo. Cabría entonces formular otra pregunta: ¿existe algún ingrediente que escape a ese extraño comportamiento? La respuesta no es aún definitiva. Si no se entiende ese comportamiento a nivel elemental, ¿cuál es entonces el valor predictivo de las ciencias cuánticas, como podrían denominarse en su conjunto las disciplinas que tienen algo que ver con esa extraña fenomenología que escapa al sentido común y pone en tela de juicio el determinismo mecanicista? ¡Es muy grande!, de ello se tiene pleno convencimiento.

Hace poco más de siete años, durante la inauguración de la Cátedra Manuel Ancízar titulada «Albert Einstein, creador de universos», celebración del centenario de sus famosas teorías que nos mostraron otra forma de hacer ciencia, el profesor John Ellis, director en ese momento del CERN (Organización Europea de Investigación Nuclear) nos decía algo como esto (la frase literal no la

recuerdo): *La física es el manual de operación del Universo*. Suena exagerado, particularmente a la luz de lo anterior, pero...

Un manual que sirvió en cierta medida de inspiración para este texto virtual y para un anterior ensayo titulado *Unos cuantos para todo*, disponible como éste en versión electrónica, se escribió hace setenta y cinco años y mantiene una sorprendente validez, aunque su visión sobre los *cuanta* no sea la hoy extensamente aceptada. Uno de sus autores es en el campo científico el personaje más admirado por el autor. A él dediqué una modesta *monografía* en la cual el lector encontrará algunas de las ideas básicas de la física cuántica aportadas por el que muchos reconocemos como *genio entre genios*; este fue precisamente el título escogido para aquel ensayo (disponible también en la página de «Buinaima»). El de Einstein, escrito con Leopold Infeld en 1938, se denominó: *Evolución de la física*. Sus autores escriben en el tercer párrafo del primer capítulo, primera sección titulada *EL GRAN MISTERIO* (sic en la edición de Salvat, 1986):

> «El gran misterio permanece aún sin explicación. Ni siquiera podemos estar seguros de que tenga una solución final. La lectura (del gran libro de la naturaleza) nos ha hecho progresar mucho; nos ha enseñado los rudimentos del lenguaje de la naturaleza; nos ha capacitado para interpretar muchas claves y ha sido una fuente de gozo y satisfacción en el avance a menudo doloroso de la ciencia. A pesar del gran número de volúmenes leídos e interpretados, tenemos conciencia de estar lejos de haber alcanzado una solución completa, si en realidad existe.»

Ese párrafo sigue siendo rigurosamente válido. Al *gran misterio* le han sucedido los *misterios más profundos de la física cuántica*, los cuales sin lugar a dudas empezaron con los *saltos cuánticos* sugeridos por Bohr. Formado en la disciplina científica más exitosa del siglo XX, debo reconocer mi profunda ignorancia e incapacidad para poder entenderlos a cabalidad. La prepotencia con que algunos científicos se expresan contrasta con el punto de vista más modesto de connotados divulgadores. Dice John Gribbin, astrofísico y gran difusor del conocimiento científico acumulado:

> «Si abrimos los brazos todo lo que podemos y consideramos que toda la historia del universo es de la punta de un dedo a la otra punta, toda la historia de la civilización humana se eliminaría en un momento si se pasa una lima por una uña. Así de insignificantes somos en el tiempo, y somos igual de insignificantes en el espacio.» http://www.eduardpunset.es/charlascon_detalle.php?id=6

No en balde nos recuerda Einstein: "El eterno misterio del mundo radica en su inteligibilidad… El hecho de que sea comprensible es un milagro." Me atrevo a hacer mía la frase suya y de Infeld en el texto citado: la lectura de varios tomos de lo que se conoce hoy sobre *el gran misterio* ha sido una fuente de gozo y satisfacción también para mí… y de reflexión, precisamente porque el avance en el conocimiento científico (y tecnológico) es a menudo doloroso, como lo reconoce Einstein; algo de aquello, en el *campo cuántico*, es lo que quisiera compartir con el lector a continuación.

La iniciativa para escribir esta guía o manual, no de funcionamiento del universo, ni siquiera para comprender una parte de él, solo de introducción al curso-cátedra «100 años de saltos cuánticos» surgió básicamente de dos consideraciones. Primero, de la necesidad de contribuir a "explicarle" a la mayoría de los participantes de la cátedra el extraño comportamiento de los entes cuánticos, los mismos que pueblan los objetos a nivel atómico-molecular y a escala nanométrica y dan a estos propiedades muy diferentes a lo que esos mismos constituyentes básicos exhiben a nivel macro.

En el camino me encontré con una sorprendente realidad: no solamente puede afirmarse que *nadie entiende la mecánica cuántica* (véase la penúltima sección del primer capítulo), sino peor aún, la mayoría la interpreta equivocadamente. Al decir *la mayoría*, debo aclarar que me refiero principalmente a la mayoría que la desconoce, quiero decir, los no científicos… pero también, un poco menos, a los que no son físicos… y a los que solamente utilizan sus recetas para *ganarse la vida*; dicho sin ambages, los que solo se preocupan por *resolver* la ecuación de Schrödinger… o la de Dirac. Esta posición, la cual algunos de mis colegas encontrarán demasiado radical, requiere de alguna explicación.

Parecería tonto preocuparse porque *el hombre y la mujer ajenos a la academia* (*el hombre de la calle*, solían llamarlo a comienzos del siglo pasado), en especial el amplio grupo que se desentiende de las ciencias y las ingenierías, no interpreten adecuadamente una teoría que *ni les va ni les viene*. Soy enfático en afirmar que no lo veo así. Preocupa en grado sumo ver cómo los nuevos impostores, algunos líderes de *la nueva era*, aprovechan la ingenuidad y la sed de *explicaciones fáciles* de la gente del común en el tema para embaucarlos de nuevo, como siempre se ha hecho a través de la historia con la ignorancia de la gente.

Pero no es solamente a la gente *del común* a quien timan los nuevos impostores; es todavía peor: las víctimas, o los engañados por los *neoerenses* (un adjetivo quizá demasiado genérico para designar a las personas de alguna manera adscritas a las distintas agrupaciones de la *Nueva Era*) suelen ser personas con suficiente bagaje intelectual como para acceder a la explicación científica que el asunto requiere. Esta es la segunda razón que tuve para haber propuesto a la Dirección Académica de la Universidad Nacional de Colombia –Sede Bogotá– el curso que ofrecí por varios años, para haberme aventurado en la escritura de estos y similares ensayos y para proponer, conjuntamente con mi colega Karen Fonseca, la realización de esta cátedra en homenaje a Niels Bohr. Suele asegurarse que la astrología surgió de la ignorancia; me atrevo a afirmar que no fue así, puesto que sus gestores y consumidores eran gente culta en su tiempo; puede decirse que, de alguna manera, en su momento cumplió su cometido en el contexto histórico. Después se volvió engaño y negocio lucrativo, dependiendo de la habilidad para *convencer* de unos y de las necesidades sentidas por otros; hoy es necesario practicar el engaño en forma más sofisticada... y por desgracia *el cuento cuántico* da para eso. Para decirlo más explícitamente, en la cacareada *Sociedad del Conocimiento* no deberían aceptarse explicaciones tan banales como las que proponen algunos que se hacen pasar por líderes espirituales, *cuánticamente desorientados*. Digo esto porque personalidades como el Dalai Lama, para citar solo un ejemplo, son una excepción a los cada vez más abundantes *líderes espirituales* de las *religiones de garaje*.

Lo anterior me lleva a concluir que sí interesa a todos tratar de comprender, al menos captar dónde radica, en primer término, la dificultad para entender con nuestra lógica convencional el extraño comportamiento de los entes cuánticos; en segundo lugar, hasta dónde puede llegar la influencia, por ende las aplicaciones de unas propiedades que usualmente se consideran del dominio exclusivo de *lo diminuto*; en tercero, prepararse para rebatir a los *falsos apóstoles*. Para evitar polémicas interminables, aceptemos que la religión y la ciencia van por caminos diferentes y buscan diferentes propósitos; al menos su(s) método(s) es (son) diferente(s).

Pero hay algo más: la tecnología hoy, con mayor razón la de mañana, dependen de ese extraño comportamiento. Se afirma, sin exagerar, que más del 50 % del PIB (producto interno bruto) de los países desarrollados proviene de ahí. En ese estimativo se quedan cortos, porque únicamente tienen en cuenta la industria optoelectrónica convencional y sus derivados. Si se proyectara el impacto que tendrán próximamente los efectos de la segunda revolución cuántica (a la que estará dedicada gran parte de la cátedra), el porcentaje crecerá significativamente. La tecnociencia hoy, con mayor razón la del futuro, es poderosísima; la dependencia de la civilización en esos aspectos sigue creciendo. Mas como dice Sagan (*El mundo y sus demonios*, capítulo 2, «Ciencia y Esperanza»):

> «Hemos preparado una civilización global en la que los elementos más cruciales –el transporte, las comunicaciones y todas las demás industrias; la agricultura, la medicina, la educación, el ocio, la protección del medio ambiente, e incluso la institución democrática clave de las elecciones– dependen profundamente de la ciencia y la tecnología. También hemos dispuesto las cosas de modo que nadie entienda la ciencia y la tecnología. Eso es una garantía de desastre. Podríamos seguir así una temporada pero, antes o después, esta mezcla combustible de ignorancia y poder nos explotará en la cara.»

Hago mías las palabras de Sagan, particularmente cuando estimo que una buena proporción de ese 50 % o más del PIB, representado en ganancias de las multinacionales que viven de la guerra y de la expoliación y en el *perfeccionamiento* de la globalización económica, *fundamentalismo de mercado*, sin hacer nada por aliviar sus consecuencias desastrosas en una mal llamada *Sociedad del Conocimiento*, es gastado pues insensatamente. La arrogancia de los poderosos y la insensatez de todos, «mezcla combustible de ignorancia y poder», parecen ser la divisa de esta sociedad.

Y ya que hablamos de ese fundamentalismo, de la ignorancia y de una de las consecuencias de ambos, la guerra entre otras, refirámonos también a los fundamentalismos *religioso* y *político*, causantes de tanta violencia y atropello en la historia lejana y reciente de la humanidad, dando por descontado los innegables intereses económicos que acompañan a los líderes de uno y otro bando. La ignorancia de la mayoría hace a ésta presa fácil de la avaricia desmedida de aquellos. Se suele hablar de las nuevas tecnologías de la información y de la comunicación (t.i.c.) como el factor crucial de desarrollo en la era actual. Esto último es parcialmente cierto, pero también es ciertísimo que aquellas, las nuevas t.i.c., dependerán cada vez más fuertemente de los fenómenos cuánticos.[*] ¿Contribuirán ellas a excluir más a los excluidos de siempre y a deteriorar irremediablemente el medio ambiente, o podremos revertir la situación? Baste con decir que estas notas tienen como tercera motivación contribuir a combatir *desde la inteligencia* esos fundamentalismos y desenmascarar sus consecuencias, causa y efecto resultantes del talento mal empleado de unos pocos y del analfabetismo tecnocientífico (o de otros analfabetismos) de las mayorías, consumidoras de productos mediáticos de la tecnociencia, inspirada cada vez más en las revoluciones cuánticas.

[*] Más que las t.i.c., desde Buinaima pregonamos que deberían ser los TIC (talento, ingenio y creatividad) lo que se promoviera desde una educación pensada para el siglo XXI.

El año 2009, año en el cual publiqué por primera vez **Unos cuantos para todo**, fue denominado el **Año Internacional de la Astronomía**. Fue *el año de Galileo*, celebración del extraordinario invento, el telescopio que lleva su nombre, el que permitiera a aquel dirigir una *mirada cercana* a esos objetos lejanos, es decir *a los cielos*, hace ya 4 siglos. Fue también el bicentenario del nacimiento de Darwin y conmemoración de los 150 años desde cuando se publicó «El origen de las especies». No hay duda alguna sobre el impacto del microscopio en la obra de Darwin. Incidentalmente fue el año de la celebración del cincuentenario de creación del primer departamento de física en Colombia, el de la Universidad Nacional. Pues bien, en estos cuatro siglos ha cambiado radicalmente nuestra visión del Universo; y ello ha ocurrido particularmente durante la última centuria, es más, precisamente durante los últimos 50 años (el descollante y pionero artículo de Bell fue publicado en 1964). También ha cambiado nuestra visión del mundo, en general. Dice Stephen Hawking, otro de los grandes de la física y de la astronomía, además de gran divulgador: "El mundo ha cambiado mucho más en los últimos cien años que en cualquier siglo precedente. La razón de ello no han sido las nuevas doctrinas políticas o económicas, sino los grandes desarrollos auspiciados por los progresos en las ciencias básicas." Quiero complementar esta cita con otra de Carlos Eduardo Maldonado, tomada de un texto suyo sobre *Nanotecnociencia* (Giraldo, 2007) comentando precisamente la anterior reflexión de Hawking:

> "No son pues, las doctrinas éticas ni morales las que han hecho posible la vida hasta hoy. Todo lo contrario, es en nombre de determinado Dios en contra de Otro, que los seres humanos han armado guerras, en nombre de determinados Principios que se han emprendido cruzadas, crímenes, asesinatos y guerras de toda índole. Lo que nos ha hecho posible vivir hasta hoy, por el contrario, es el trabajo de personas como Pasteur, Volta, Fleming, y muchos otros. La enseñanza de la ética no garantiza seres humanos auténticos, pero el buen trabajo con ciencia o con música, por ejemplo, sí genera estructuras mentales y espirituales que pueden garantizar y hacer posible la vida. Esta es la otra cara amable del positivismo." (Subrayado por mí.)

Ya que hago referencia a la nanotecnología, permítaseme agregar que tuve el privilegio de participar como conferencista, con el tema *Nanología*, en otra Cátedra José Celestino Mutis, la que se realizó durante el 2º semestre de 2008, la cual versó sobre el tema: *Innovación – el desafío para el desarrollo en el Siglo XXI*. La cátedra fue creada por iniciativa de la Facultad de Ciencias para conmemorar el bicentenario de la muerte del ilustre científico español. Mutis tuvo una marcada influencia en nuestra primera emancipación, de la cual no hace mucho celebramos el bicentenario. Casi por azar, cuando me preparaba para enviar a imprenta las notas que precedieron a esta, tuve la fortuna de recibir de manos de su autor, el amigo, colega y sociólogo Gabriel Restrepo, un ensayo todavía inédito titulado: "La obra de un día no es suficiente. Una noche no alcanza", con dos poemas de Mutis traducidos del latín al español. Una primera ojeada al ensayo despertó en mí el interés (tardío, *mea culpa*) por el personaje, quien "sentó las bases de la revolución científica e ideológica en el Virreinato de la Nueva Granada cuando, en el discurso inaugural de la cátedra de matemáticas del Colegio Mayor del Rosario, expuso los principios elementales del sistema de Copérnico: fue la presentación de una nueva metodología, la del eclecticismo, y de una novedosa actitud ante el mundo y la vida, que significaba el abandono del

fanatismo y la credulidad, para entrar en los terrenos de la física de Newton." (http://www.biografiasyvidas.com/biografia/m/mutis.htm) En el ensayo de Restrepo leo: murió en 1808, dos años antes de la emancipación, pero su figura fue decisiva para la misma (subrayado por mí). Los centenarios y bicentenarios también sirven para recordar que *la ciencia no es tan neutral como la suelen presentar.* Restrepo, generoso y docto autor de la presentación de aquellas notas (*Una nueva guía para perplejos*), la cual he reproducido con gran satisfacción en esta nueva versión, nos ha abierto caminos antes inexplorados hacia la *tercera cultura*. Esta es la motivación principal para estas notas: acercar lo que considero más representativo de las ciencias naturales del momento, *las ideas cuánticas*, al mundo de las humanidades y de las artes. No alcancé a terminar la versión definitiva de las mismas antes de iniciar la cátedra, por lo que serán entregadas *a retazos*. El orden pensado es el siguiente.

El capítulo primero recrea al lector en un rápido recorrido por las primeras ideas sobre el mundo cuántico. El segundo intenta explorar lo que consideré más relevante para el lector desprevenido (algunos aspectos clásicos y otros cuánticos) antes de incursionar propiamente en el tema; pueden dejarlo totalmente de lado quienes ya tienen alguna formación en los clásicos asuntos de la física cotidiana y nociones sobre física moderna. Así que el tema a tratar empieza en realidad a partir del tercero, con la mirada experimental de un teórico. Después de referirme a algunos experimentos que considero cruciales para el desarrollo del formalismo y el punto de partida **básico** para éste, se toca tangencialmente el *punto crucial*, sin recurrir a las matemáticas. El cuarto capítulo es muy conceptual. Está dedicado a profundizar en el principio de superposición, clave del formalismo, sin recurrir a las matemáticas. El quinto es el más delicado: tiene que ver con esas *acciones fantasmagóricas a distancia* que tanto incomodaron a Einstein y a muchos que como él *renegaron* de la interpretación de Copenhague. Concluyo en el capítulo sexto con algunas reflexiones recogidas aquí y allá, desde cuando intenté un acercamiento clásico al problema, acercamiento que me condujo al actual distanciamiento de quienes todavía buscan *interpretaciones a lo clásico*.

Mucho camino nos queda por recorrer hacia la segunda revolución cuántica (las aplicaciones que desde ya se avizoran) y para la comprehensión, si es correcto utilizar el término en el presente caso, de sus principios, siendo estos en esencia los mismos que establecieron sus fundadores. Pero recuerde, amigo lector: *se hace camino al andar*. No hay que deshacerlo refugiándose en la pseudociencia. Ni contentarse con «callar y calcular».

Bogotá, Ciudad Universitaria, Febrero de 2013

Capítulo Primero

Retrospectiva cuántica



Los objetos cuánticos se comportan como ondas y como partículas. Eso fue lo que en esencia propuso un aristócrata estudiante francés, el príncipe Louis Victor Pierre Raymond de Broglie, en 1923. ¡Dio en el blanco! Su hipótesis ha sido verificada en diversas formas, en los más variados experimentos, realizados desde entonces. Vale la pena aclarar: esos objetos se manifiestan como ondas o como corpúsculos. Pero hay más: los *quanta* están por todas partes; y sirven, rigurosamente hablando, para todo.

Figura 1.1 Louis de Broglie (1892 – 1987).[1]

Excepto porque durante el siguiente cuarto de siglo se elaboraron diferentes versiones de la misma teoría y se profundizó en su interpretación más radical, con enormes beneficios en sus aplicaciones prácticas, poco se ha avanzado desde entonces en su fundamentación matemática. Es ésta la que garantiza los mismos resultados en cualquiera de las formulaciones posibles.

La vieja teoría cuántica nació en medio de la primera Guerra Mundial; la nueva, en el *fragor de las batallas* de la segunda; muchos de sus protagonistas principales (Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, para mencionar solo unos pocos nombres entre los más selectos) estuvieron involucrados en una u otra forma. En los primeros 25, 20 o 12 años, dependiendo del acontecimiento histórico que se tome como referencia para fijar el origen de su historia: desde la hipótesis de Planck, formulada en 1900, si se arranca con la fórmula empírica que describía correctamente la radiación de cuerpo negro a partir de los *quanta* de energía; desde el postulado de Einstein sobre los *quanta* de radiación, enunciado cinco años más tarde, cuando sin decirlo con claridad se asumió que la luz era onda o corpúsculo, dependiendo del aspecto que tuviera que destacarse; o desde el modelo de saltos cuánticos de Bohr al que ya nos hemos referido, hasta cuando de Broglie propuso para los electrones lo mismo que Einstein había propuesto para la luz, su carácter *dual*, se abrió camino la formulación matemática adecuada, desde puntos de vista aparentemente contradictorios, y se demostró que las diferentes versiones de la teoría eran equivalentes. Bastaron 2 o 3 años más para encontrar un camino de desarrollo conceptual que nos alejaría definitivamente de la interpretación clásica del mundo. A ese periodo le denomino *la primera revolución cuántica*. Ahora estamos, creo, en *la segunda*. Detalles adicionales a los que en este capítulo menciono sobre su desarrollo a lo largo de esa primera etapa pueden verse a partir del tercero y en las referencias. En este y el siguiente, se quiere dar al lector no iniciado un bagaje conceptual que le permita entender las dos revoluciones provocadas por esa extraña teoría en

---

[1] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1929/broglie-bio.html

menos de un siglo, vale decir, sacar un mayor beneficio de la cátedra a desarrollar durante el presente semestre. El último capítulo servirá de introducción a la actual, la que creo que se está iniciando.

Planck había lanzado en 1900 una hipótesis desesperada que consistió en suponer que un cuerpo recibe y da energía en forma discreta. Los paquetitos (*quanta*) de energía serían extremadamente pequeños, por lo que para la mayor parte de los propósitos prácticos el hecho seguiría siendo equivalente a hacerlo en forma continua, como corresponde al comportamiento clásico conocido por todos.[2] No lo era para poder restablecer matemáticamente el equilibrio termodinámico, roto por la *catástrofe ultravioleta*, presente según la teoría clásica en la radiación termo-electromagnética de un *cuerpo negro*.[3] Pero no encontró otra salida y por eso la denominó *una hipótesis desesperada*. El ajuste de Planck fue solo un primer paso, dado tímida y temerosamente, muy a su pesar, con la esperanza de encontrar pronto un mejor raciocinio. Esa esperanza le condujo a aceptar 14 años más tarde la interpretación estadística de la entropía propuesta por el vienés Ludwig Boltzmann, herramienta usada a regañadientes en el proceso deductivo de su famosa *Ley de Radiación*. En 1900, y todavía en 1905, la mayor parte de los científicos alemanes estaban muy lejos de aceptar siquiera la hipótesis atómica, empleada por el padre de la física estadística.[4] Boltzmann se suicidó en 1906, en parte como consecuencia de sentirse derrotado dentro de esta controversia científico, ignorando que Einstein había demostrado teóricamente su modelo atómico (discontinuo) de la materia y sentado las bases para que se hiciera la comprobación experimental incontrovertible.

Planck no requirió explícitamente de la hipótesis atómica pero, tratando de no dar pasos en falso, abrió un camino todavía más incierto. A la postre, la cuantización resultó ser imprescindible, tanto para entender el comportamiento de la materia a escala atómica y subatómica y su interrelación con la radiación electromagnética, camino abierto en forma inequívoca por Einstein y Bohr, como para arrojar luces sobre nuestro origen en la escala cósmica. Simultáneamente se estaba preparando el terreno para una revolución tecnocientífica sin precedentes que apenas comienza, con alcances todavía inimaginables.[5] Fueron particularmente estas circunstancias las que quise evocar con el título dado a las notas, aún preliminares, que precedieron este ensayo: *Unos cuantos para todo*.

---

[2] El valor de la constante característica, expresado en las unidades más usuales en nuestra escala, parece *ridículamente minúsculo*: $h \approx 10^{-34}$ J·s (recuérdese que joule es unidad de energía y trabajo); para efectos de comparación, un foco o bombillo de 100 watts consume en un segundo 100 J, y un fotón de 10^{15} Hertz (unidad de frecuencia u oscilaciones por segundo) tiene 10^{-18} J ($\approx$ 10 eV o electrón-voltios, unidad de energía más adecuada en esta escala). La llamada *escala de Planck* es todavía más diminuta; en notación científica, en las unidades convencionales, la escala de tiempo de Planck es aproximadamente 10^{-43} s. La escala de longitud, $\approx 10^{-33}$ cm, es esta cantidad multiplicada por la velocidad de la luz. Si se quiere ver a menor escala su constante, teniendo en cuenta que 1 J es 1.6×10^{-19} eV, $h \approx 10^{-15}$ eV·s. ¡Aún en la escala del electrón, esa cantidad sigue siendo muy pequeña! Véase más adelante, sección 2.1, para efectos de la notación científica y las unidades utilizadas en este ensayo.

[3] A explicar la terminología puesta en bastardilla se volverá en capítulos posteriores. En ocasiones utilizaremos ese formato solo para enfatizar.

[4] En la primera presentación de su resultado empírico ante la Academia de Ciencias, 3 meses antes de la histórica presentación que tuvo lugar el 14 de diciembre de aquel mismo año, Planck no utilizó la constante *h*.

[5] Véase *Nanotecnociencia*, J. Giraldo *et al*. (Ediciones Buinaima, Bogotá, 2007.)

1.1 Granos de energía

De allí a suponer que no solo ocurre tal cosa, la de la absorción y emisión discretas, sino que también la energía de la radiación está cuantizada parece haber solamente otro modesto paso, pero no es así. A nadie que hubiera sido formado en la exitosa escuela de la física de fines del siglo XIX se le habría ocurrido imaginar que las ondas electromagnéticas pudieran perder su carácter hasta ahora peculiar, *ser ondas*, sinónimo de *continuum*, para convertirse en *corpúsculos de energía*, algo discreto, los hoy denominados fotones.

La pugna entre los dos modelos propuestos para la luz, corpuscular y ondulatorio, se había ganado en varios campos a favor del segundo desde los tiempos de Isaac Newton, gracias a los experimentos de su contemporáneo el holandés Christian Huygens. Luego, durante el siglo XVIII, matemáticos de la talla del suizo Leonard Euler y físicos destacados como el norteamericano Benjamin Franklin reforzaron ese punto de vista. A comienzos del siglo XIX, el británico Thomas Young y el francés Augustin Fresnel dieron el golpe de gracia: no hay duda alguna, ¡la luz es una onda![6] Resultaba pues experimentalmente comprobada la ondulatoriedad de la luz.

Lo contrario ocurriría a finales del mismo siglo con el responsable del *fluido eléctrico*, el electrón, develado como corpúsculo por J. J. Thomson, en contra de la conclusión a que había llegado Hertz cuando lo denominó *rayo catódico*: ¡esto, aunque no puedan verlo directamente a nivel individual, es una partícula, una partícula subatómica! Fluido era, hasta entonces, sinónimo de *continuo* como las líneas matemáticas introducidas por Michael Faraday para el campo eléctrico cuando era ayudante de laboratorio del químico Humphrey Davy. Faraday las denominó *líneas de fuerza*. Formada de infinitos puntos, en la línea no hay separación física entre uno y el siguiente, rigurosamente hablando. Parecería que las descargas eléctricas son eso, líneas continuas. Faraday introdujo también las líneas de flujo magnético. A partir del descubrimiento de Thomson, uno podría imaginar que, así como hay cargas eléctricas *puntuales*, léase diminutas, también debería haber cargas magnéticas. Mala noticia: el monopolo magnético no ha sido encontrado aún. Sobre estos asuntos volveremos en el próximo capítulo.

Así, pues, a finales del siglo XIX había sido plenamente establecido que: la luz, por ende la radiación electromagnética, es una onda; mientras que el electrón, de manera similar otras partículas de carácter atómico halladas posteriormente, p.e. el núcleo que sería descubierto precisamente por el sucesor de Thomson en Cambridge, *serían a todas luces corpúsculos*. Esas dos conclusiones experimentalmente incontrovertibles rodarían por tierra. En 1916 Millikan, tratando de demostrar lo contrario, verificó la atrevida hipótesis de Einstein sobre la granularidad de la luz. De aceptarse la hipótesis de de Broglie con que iniciamos este capítulo, el electrón se comportaría como lo hacen las ondas. Pero su hipótesis parecía todavía más difícil de aceptar. Lo más osado de este estudiante era sostenerlo ante el exigente jurado de su tesis doctoral, dispuesto a pedir explicaciones satisfactorias; tendría que hacerlo con argumentos tan contundentes como para hacer cambiar de opinión a los ortodoxos físicos, casi todos ellos formados en la más prestigiosa ciencia de los siglos XVII, XVIII y XIX.

---

[6] Véase la sección 2.6 y el parágrafo 2.8.2.

La segunda mitad del siglo XIX había visto surgir la más hermosa teoría hasta entonces concebida por la física, a la que ya hemos hecho referencia: la electrodinámica clásica. Su gestor fue el británico James Clerk Maxwell, primer catedrático del entonces recién creado laboratorio Cavendish, donde más tarde fueron descubiertos los constituyentes del átomo: una especie de Abdera experimental. Fue en Abdera, situada en la costa de Tracia, donde a finales del siglo V antes de nuestra era, los filósofos griegos Leucipo y Demócrito enseñaron que toda la materia está constituida por átomos y espacios vacíos. Para ellos, la luz estaba constituida de diminutas partículas. Maxwell, atomista como sus predecesores en Abdera, a diferencia de los más destacados físicos alemanes, antiatomistas, fue el gran unificador de los fenómenos eléctricos y magnéticos; pero fue más lejos. El conjunto de la teoría, formulado de manera matemática, le permitió predecir la existencia de ondas electromagnéticas que viajarían a la velocidad de la luz, la más alta velocidad de propagación aceptada hoy en día, 3×10^{10} cm/s. Estas ondas se propagarían en un medio muy singular, denominado *éter luminífero*.

Supondrá el lector desprevenido, a partir de la información anterior, que la confirmación de la existencia de esas ondas se hizo en Cavendish. Maxwell era un teórico y, hasta cierto punto, podría decirse que descuidó el laboratorio a su cargo. Tal vez esa haya sido una razón histórica para que el gran salto experimental lo dieran los físicos continentales. En 1887, ocho años después de la muerte de Maxwell, el alemán Heinrich Rudolf Hertz produjo en su laboratorio esas ondas, posteriormente denominadas ondas de radio (u ondas hertzianas; por algo se miden en hertzios), y las comparó con las de luz: todo cuadró espléndidamente. Las suyas, a pesar de tener una *longitud de onda* λ mayor en varios órdenes de magnitud, correspondientemente una *frecuencia* ν muchísimo menor, tienen una velocidad de propagación que resulta ser exactamente igual a la de la luz visible, de tal suerte que el producto de las dos, $\lambda\nu$, da la misma constante c (velocidad de la luz) a cualquier frecuencia: $c = \lambda\nu$. Si algún ajuste adicional había que hacer, *afectaría a la décima cifra decimal*, como supuso Maxwell.[7]

Así pues la luz, una onda muy peculiar, visible en un estrecho espectro de frecuencias, se movería en el éter a una velocidad en números redondos dada por: $c = 3\times10^8\ m/s$. El espectro se extiende, en principio, a todos los valores positivos de frecuencia.[8] Las microondas no son micrométricas, más bien son centimétricas, al menos milimétricas, enormes en su longitud de onda si se las compara con las nanométricas (cientos de nanómetros) de la luz visible o las más cortas aún, ultravioletas.

Dijimos que a nadie se le habría ocurrido llevar la contraria ante tan rotundas evidencias... excepto...

Romper con puntos de vista varias veces comprobados, tanto en el terreno teórico como en el campo experimental, fue el osado paso que se atrevió a dar el joven Einstein, todavía pendiente de su grado, en 1905. Su propuesta parecía volver al pasado, dándole la razón a Newton, pero difería radicalmente de este último. Para ello concibió dos modelos de la luz diametralmente opuestos:

---

7 Véase el primer capítulo de *Nanotecnociencia*, principalmente la sección 1.6.

8 Véase la sección 2.8.2

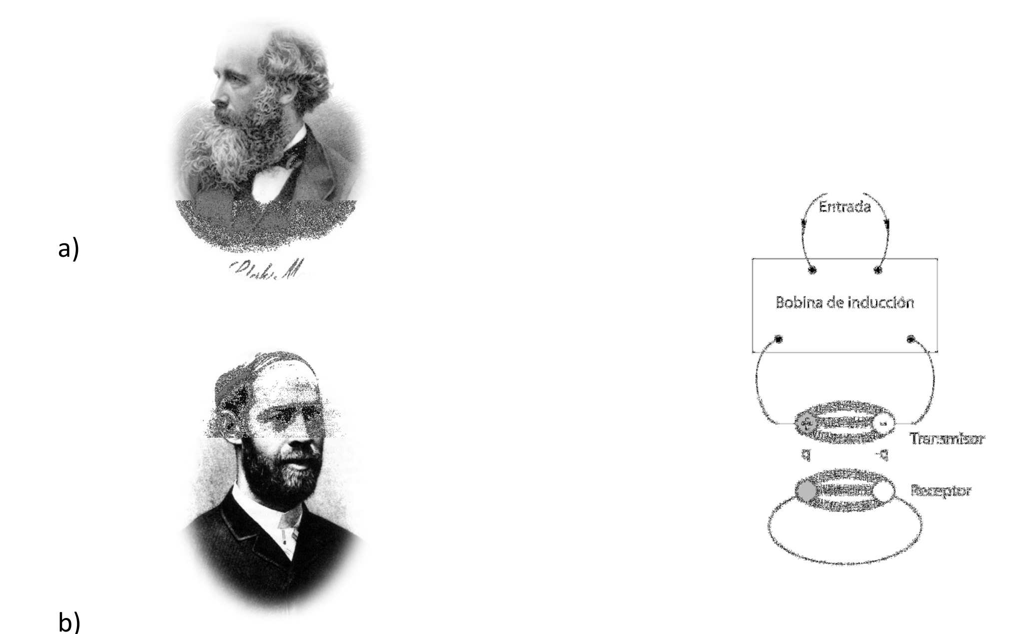


Figura1.2. a) James Clerk Maxwell (1831-1879); b) Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894); c) Diagrama esquemático del aparato ideado por Hertz para generar y captar ondas electromagnéticas.

- El primero se apoya en resultados de 1887, los del meticuloso experimento de Michelson-Morley, al que se volverá más adelante. Con él introduce dos postulados, el primero en realidad consistente de 2 hipótesis novedosas: i) a diferencia de otras ondas, la luz no necesita de medio alguno para propagarse; ii) en el vacío, la luz viaja con la máxima velocidad que es posible alcanzar, la cual resulta ser la misma en todo sistema de referencia. Con esta segunda hipótesis, Einstein establecía además una nueva concepción del espacio y del tiempo: el conjunto *espacio-tiempo*, en el que ocurren tanto la dilatación de los intervalos temporales como la contracción de los segmentos espaciales en la dirección de la velocidad de los cuerpos en movimiento, es inseparable. Así, pues, el tiempo y el espacio forman parte de un mismo ente, es <u>un conjunto tetradimensional</u>. Ese es el origen de su Relatividad Especial. Posteriormente habrá de suponer que ese espacio-tiempo resulta de la evolución de la *materia-energía*. La materia-energía es también un conjunto inseparable: hay una equivalencia entre las dos que permite la transformación de la una en la otra y viceversa. Esto último es un resultado adicional consistente con sus postulados, a los que agrega el ya formulado Principio de Relatividad: las leyes de la física deben lucir las mismas en todo sistema de referencia. El modelo, ampliado, conducirá finalmente a una teoría consistente, la denominada Teoría General de la Gravitación, también denominada Relatividad General.
- El segundo parte de concepciones igualmente extrañas para la física tradicional. Se alimenta de la Física Estadística desarrollada por Ludwig Boltzmann y equipara el gas de partículas atómicas visualizadas por éste con los componentes elementales de la radiación electromagnética. Ello le permite explicar, como corolario, el efecto fotoeléctrico, un fenómeno para entonces bien conocido que no tiene explicación clásica. *La radiación*

electromagnética está compuesta de granos de energía, es la esencia de la hipótesis que revolucionará otro mundo, el de lo diminuto, de la misma manera que sus postulados para el primer modelo revolucionarían las ideas cósmicas existentes hasta entonces.

Si a diferencia de las denominadas ondas mecánicas, como el sonido, las ondas de luz pueden propagarse en el vacío, daría igual visualizarlas como si estuvieran compuestas de partículas. Pensándolo bien, es más conveniente verlas de esa manera, lo que permite imaginar que el vacío, antes que frenarlas, facilita su movimiento. Eso fue justamente lo que hizo aquel joven revolucionario en el año memorable de 1905. Partió, pues, en primer lugar, de una reformulación de la mecánica: en el primer esquema, se ratifica un principio de relatividad que deja intactas las ecuaciones de Maxwell, modifica la segunda ley de la mecánica, en contra de la concepción de Newton sobre masa invariante en el espacio y el tiempo absolutos, y de paso liga la existencia de estos entes, espacio y tiempo hasta entonces abstractos, a la presencia de la materia y la energía, difuminándolos aún más: sin materia-energía no tiene sentido hablar de espacio-tiempo.

En el segundo esquema, sin observar que estaba echando por la borda también los principios maxwellianos, resucitó el concepto de corpúsculos luminosos, corpúsculos ahora dotados de propiedades muy especiales, y enterró de paso la idea de *éter luminífero*.

En efecto, en el nuevo esquema la materia (masiva, por ende con interacción gravitacional) es equivalente a la energía (la radiación, por ejemplo, partículas sin masa en reposo), y se introduce de paso un postulado que a todas luces, dentro de la lógica del sentido común, parece absurdo: el de la constancia de la velocidad de la luz en todos los sistemas de referencia, valor límite a la propagación de la información, de la energía y, por supuesto, de la materia toda. Ese postulado llevaría a la conclusión de que *la luz no envejece*, una propiedad que bien quisiéramos tener los que de ella vivimos y nos nutrimos, seres vivos de todas las especies posibles.[9]

Así, pues, en contra de la *evidencia experimental* aportada por sus predecesores británicos y franceses, Einstein asumió en uno de sus trabajos, quizá al que menos importancia le dio entonces, que la energía de la radiación electromagnética era transportada por corpúsculos que viajan a velocidad c en el vacío.[10] Cincuenta años después se estaría lamentando de no entender *qué son* esos tales granos de luz. Puede afirmarse que seguimos sin entenderlo.

Según Einstein, cada corpúsculo de la luz tendrá energía $E = h\nu$, siendo ν la frecuencia de la luz y h la constante de Planck,[11] pero la frecuencia con que se observen esos granos emitidos por la

[9] Hay organismos anaeróbicos, pero sin la luz, en alguno de sus rangos de frecuencia, es inconcebible cualquier proceso químico, mucho menos biológico o vital.

[10] Los artículos que Einstein publicó en 1905 fueron: "Sobre el movimiento requerido por la teoría cinética molecular del calor de pequeñas partículas suspendidas en un líquido estacionario", en el que se explica el movimiento Browniano; "Un punto de vista heurístico sobre la producción y transformación de luz", en el que se estudia y explica el efecto fotoeléctrico; "Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento", fundamento a la teoría de la relatividad especial; "¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía?" en el que se analiza la equivalencia masa-energía con la fórmula $E = mc^2$, siendo E la energía, m la masa y c la velocidad de la luz. Un quinto trabajo publicado fue su tesis de doctorado.

[11] Planck y Einstein son los protagonistas principales del presente capítulo; vale decir, para poder concentrarnos en las implicaciones de sus postulados, no insistiremos en las aplicaciones tan diversas, entre ellas, la física atómica, la física nuclear, la física de partículas, la astrofísica, la física del estado sólido y

materia dependerá de la velocidad con que se mueva el emisor con respecto al observador (recuérdese que $c = \lambda\nu$, siendo c constante). El resultado luce prácticamente igual a la *fórmula de Planck*, pero para llegar a él hay que partir de hipótesis más atrevidas que la suya. Tanto que ninguno de los físicos del momento tomó en serio a Einstein. De hecho, hay que suponer, como veremos, que un corpúsculo y una onda se comportan *de la misma manera*, una afirmación que nadie, ni el intrépido Einstein, estaría dispuesto a aceptar. Veinte años después, la explicación de un experimento conceptualmente más sencillo que el de las bolas de billar, el choque entre un fotón de alta energía y un electrón en reposo, el llamado *efecto Compton*, no dejó lugar a dudas: *la luz, un típico fenómeno ondulatorio, está compuesta de corpúsculos* que se mueven permanentemente a velocidad *c* y cuya energía (léase frecuencia de la onda, ν) depende del observador. Otro aspecto notable, consistente con lo anterior, es que el efecto Doppler característico de las ondas sonoras también ocurre con los corpúsculos de luz, comportándose entonces como ondas, con consecuencias cosmológicas tan trascendentales como la ley de Hubble. Esos granos de energía, a los que no cabe asignárseles masa en reposo, adquirirán otras propiedades adicionales en su generalización de la teoría de relatividad.

Da la impresión, al leer los textos convencionales, de que la revolucionaria propuesta de Einstein fue motivada por la búsqueda de una posible explicación al denominado *efecto fotoeléctrico*. Eso no es cierto. Einstein había estado trabajando en la estadística de un gran enjambre de corpúsculos por espacio de varios años, lo que le permitió entender a fondo los conceptos subyacentes en la física estadística de Boltzmann. Su familiaridad con el tema le permitió descubrir errores conceptuales o contradicciones en el procedimiento seguido por Planck. La explicación del efecto fotoeléctrico, al que se hará referencia más adelante, fue apenas un corolario de su revolucionaria hipótesis. Vale la pena mencionar, de paso, que el *efecto Compton* ya aludido, descubierto en 1923, mucho después de que Einstein publicara su hipótesis, fue también una consecuencia lógica de la nueva concepción sobre la luz: un rayo de luz es un enjambre de fotones. Cuando alguno de los miembros de ese enjambre golpea una minúscula partícula, el electrón, pueden ocurrir varias cosas dependiendo de las condiciones, del entorno en que se encuentre. Si el electrón está libre o *cuasilibre*, se recrea el juego de la mesa de billar... pero en condiciones cuántico-relativistas. La denominación dada a los granos de luz, fotones, fue introducida por el químico norteamericano George Lewis en 1926.

El joven, ya graduado y en el inicio de su carrera hacia la fama, fue más lejos que Planck, aplicando esas ideas a otros campos de la física. Descubrió, por ejemplo, que se podía explicar el calor específico del diamante asumiendo que las vibraciones de los átomos en el interior del cristal (sonido) están cuantizadas: introdujo así, diríase que sin darse cuenta, los *fonones* o cuantos de sonido. Recuérdese que el calor específico de un cuerpo o sustancia es la cantidad de calor que hay que suministrarle a la unidad de masa para incrementar en una unidad (grado) su temperatura. Esa descomunal contribución de Einstein a la física del estado sólido y de la

---

tantas otras, de indudable manufactura cuántica. A ellas volveremos en los capítulos restantes y, sobre todo, en la segunda parte. Estadísticas cuánticas se suelen llamar a los formalismos que constituyen la esencia de las aplicaciones de la física estadística en diversos campos.

termodinámica, en su versión microscópica la física estadística, no ha sido suficientemente valorada. Habría, entonces, no solamente granos de energía presentes en las señales luminosas sino también en las ondas sonoras. Entonces sí, después de Einstein, puede afirmarse que: de ahí a *cuantizarlo todo*, hasta la supuestamente *inmaterial* información, en verdad había solo un paso. ¡Costosísimo, por cierto, desde el punto de vista conceptual!

Como ya se dijo desde la introducción, Bohr tomó muy en serio la propuesta de Einstein para cuantizar las órbitas de los electrones 8 años más tarde. De Broglie haría su propuesta de ondas de materia para los electrones, igualmente revolucionaria, 18 años después que la de Einstein sobre los granos de luz, en condiciones similares, tratando de explicar de paso la estabilidad de las órbitas de Bohr, para optar al título de doctor. Pero en cierto sentido la suya era una propuesta más atrevida que la de aquellos … y habría de llevar las fronteras de la física mucho más lejos, como efectivamente ocurrió en los siguientes 2 años. Otros jóvenes de entonces (Heisenberg, Dirac, Jordan y Pauli, entre otros), nacidos con el siglo, desprovistos de los prejuicios de sus antecesores, se encargarían de elaborar el formalismo. (Pauli nació en 1900, Heisenberg en 1901, Dirac y Jordan en 1902.)

1.2 Órbitas cuantizadas

Correspondió al neozelandés Ernest Rutherford abonar el terreno para preparar lo que finalmente sería un modelo cercano al actual sobre los *constituyentes últimos* de cada substancia. Rutherford llegó a Cavendish en 1895, justo a tiempo para participar del trascendental experimento de quien fuera luego su director de tesis y su provisional o temporal jefe, Thomson. Las investigaciones de aquel giraban en torno al extraño fenómeno de la radiactividad, ya mencionado, para entonces recién descubierto. No es posible en unas pocas páginas relatar detalladamente la historia de aquel periodo decisivo en el que estuvo fuertemente involucrado Bohr. En resumen, la formación de Rutherford al lado de Thomson y su familiaridad con los experimentos de sustancias radiactivas, le sirvieron para dar con el blanco perfecto en 1909, el núcleo de los elementos; se había develado nada menos que el interior del átomo. Aunque su modelo atómico planetario, electrones orbitando alrededor del núcleo, no cabía en el esquema clásico dominante, le abría espacio a una solución más radical para los serios problemas que la física de entonces afrontaba. Digamos, en síntesis, que le abrió el camino al joven Bohr y sus para nada convencionales ideas. ¡Nada volvería a ser lo mismo!

Al igual que el de Thomson, el modelo de Rutherford estaba mal, a pesar de lo ingenioso y de estar sustentado en sus propios experimentos. Bohr propuso algo mejor, a la postre también equivocado, pero con ingredientes adecuados para generar las nuevas ideas que la construcción del *edificio cuántico* requería. Sus modelos eran, a pesar de todo, mucho más realistas que el imaginado por Thomson: una especie de jalea con pasas, en donde las pasas serían los electrones y la jalea contendría la carga positiva indispensable para neutralizar el átomo; un modelo infantil para un universo que equivocadamente se supone lleno de lo que en apariencia se deja ver, a pesar de las brillantes especulaciones de los primeros atomistas, para quienes todo, salvo unos pequeños puntos de materia que denominaron átomos, era vacío. No, el átomo no solamente es divisible, su interior está prácticamente vacío, como habían previsto los atomistas, y la materia

(bariónica, hemos de corregir desde ya) se concentra en una pequeñísima región, el núcleo. Las nubes electrónicas son solo eso: insignificantes nubarrones difusos en el universo nuclear; y sin embargo, de ellos depende el comportamiento de la materia que observamos en la Tierra, la misma de la que estamos hechos, la que puebla nuestras células y la de los demás seres vivos. Una ampliación histórica sobre los diversos modelos atómicos puede encontrarse en *En busca del gato de Schrödinger* (John Gribbin, 1986).







Figura 1.3. a) *Joseph John Thomson* (1856 – 1940); b) Ernest Rutherford (1871 – 1937); c) Niels Bohr (1885 – 1962).

El modelo de Bohr sería perfeccionado en la década siguiente. Pero la historia no terminó allí. Después de 100 años de teoría cuántica, después de un siglo de logros inimaginables en la electrónica, en la física del estado sólido y de la materia condensada, en las físicas nuclear y de partículas elementales y en la cosmología, ahora resulta que ese universo nuclear (bariónico, como se le denomina hoy, por oposición al leptónico, en el que se ubican los electrones) develado por Rutherford y enriquecido por quienes le sucedieron es apenas una mínima parte del todo; la mayor parte resultó ser *invisible* para los más potentes microscopios y telescopios en más de un 96 %. En efecto, ahora parece claro que la materia oscura, la energía oscura y la energía fantasma o exótica conforman el 96 % de la materia-energía que constituye el Universo. Aquella expresión romántica, *estamos hechos de la misma materia de que están hechas las galaxias*, perdió piso. En menos de 500 años, desde la revolución copernicana, la humanidad dejó de ser el centro del universo creado por una divinidad externa a él. Ahora se sabe que cuando la especie humana desaparezca, poco importará al planeta que la generó; recuérdese la frase de Gribbin citada en la introducción; peor aún, el resto del Universo ni siquiera habrá percibido nuestro efímero paso por el Cosmos. Sirva esta *premonición* como argumento en contra de quienes, intentando dar una fundamentación científica a la *nueva astrología*, desde la *nueva era*, dicen que somos parte del *gran átomo universal*, un tema al que tangencialmente me referiré posteriormente.

Otras revoluciones se avecinan en la biología, la ciencia básica de la vida, y en la neurología, la ciencia del cerebro. Pero su relación con el presente tema no podemos vislumbrarla con claridad todavía. Tendremos que contentarnos con decir que *emergen* nuevas propiedades en esos complejos sistemas y estudiar más o menos empíricamente las nuevas fenomenologías, eso sí, dotados con instrumentos cada vez más poderosos gracias a la nueva física, a su integración con las otras ciencias y las tecnologías. Ojalá que “la arrogancia y poder” conferido por esa integración

no olvide que es incompleta y explosiva al combinarla con "ignorancia y saber". Es ahí donde se requiere de sabiduría, el uso adecuado en los asuntos humanos de ese siempre limitado conocimiento.

Examinemos por ahora el siguiente paso de alto riesgo, el dado por Bohr en 1913, intentando ensamblar distintas piezas de un rompecabezas. Su creatividad le llevó a proponer que los electrones se sentirían cómodos en algunas órbitas para las cuales sus *momentos angulares* serían múltiplos de la constante de Planck, *h-barra*. Por simplicidad, en los textos de enseñanza media suele definirse el *momento de una fuerza* con respecto a un punto como el producto de la fuerza por el brazo, también denominado *torque*. En forma similar, la magnitud del *momento* angular *L* (rigurosamente denominado momentum angular, también momento cinético) es el *momento* del *momentum* o cantidad de movimiento lineal **p**, definido éste último en magnitud como el producto de la masa *m* por la rapidez *v*, *mv*.[12] Para ilustrar el valor de esa nueva cantidad que notaremos por *L*, en el caso más trivial no nulo, cuando un objeto se mueve en trayectoria circular de radio *r*, está dado por $L = mvr$.

Como $\hbar = h/2\pi$ y $L = n\hbar$, una consecuencia de la cuantización del momento angular es que las órbitas atómicas están cuantizadas, con radios que dependen de *n* y de $\hbar$: $r_n \propto (n\hbar)^2$.[13] Se encuentra que la energía en cada *nivel* varía en proporción inversa, $1/n\hbar$, correspondiendo el menor valor posible a $n = 1$. El resultado más importante de tan atrevida hipótesis es que los electrones sólo podrán emitir radiación al *saltar de regreso* de una a otra órbita permitida, algo que echa por tierra uno de los dogmas sagrados de la teoría electromagnética clásica. Es necesario destacar que el *salto* no es clásico, es un *salto cuántico*: no hay posiciones intermedias en la *transición*, vale decir, no hay propiamente una situación transitoria del electrón en el sentido clásico de la expresión. La pregunta debería ser entonces: ¿qué fue del electrón mientras *cruzaba* de uno a otro nivel? La respuesta bien podría ser: todavía no lo sabemos. O más lacónica: ¡jamás lo sabremos! A lo mejor dejó de ser electrón para convertirse en una remota posibilidad electrónica.

Pero sí hay cosas tangibles que podemos afirmar. La energía irradiada por los átomos al saltar el electrón de una *órbita* superior a otra de menor energía es precisamente igual a la de los

---

[12] En términos sencillos, se denomina momento de una cantidad física al producto del *brazo* o distancia desde el punto de acción a un punto de referencia u origen por la cantidad física en cuestión; la definición rigurosa es un poco más complicada, pues parte de lo que se denomina producto vectorial: el momento o torque de una fuerza es $\mathbf{r}\times\mathbf{F}$. Para precisar aún más el lenguaje, es bueno hacer notar que el término *momento cinético*, cuando alude a lo que más extensamente se denomina *cantidad de movimiento angular*, es erróneo o por lo menos equívoco; *momentum angular*, es la denominación adecuada; *momento* en la primera parte de la frase es una mala traducción del inglés *momentum*, pero así lo ha establecido su uso en español. En este ensayo, se acoge por comodidad esa costumbre.

[13] El nombre, *h-barra*, hace alusión precisamente a la división de la constante de Planck por el ángulo total de la trayectoria circular, 360°, expresado en radianes. Su valor en el sistema MKSA es, como ya se dijo, de $1.05x10^{-34}\ J{\cdot}s$.

corpúsculos de energía postulados por Einstein. Fue el danés quien supo aprovechar *a fondo* la controvertida hipótesis de aquel. ¡Bohr había logrado que la ficha encajara perfectamente en el tablero del rompecabezas! De paso, Einstein y él abrieron el camino a aplicaciones tan colosales como el rayo láser. El danés conocía a cabalidad las reglas de los espectroscopistas; con su modelo de cuantización de las órbitas electrónicas, explicó de paso el origen de las líneas espectrales.

Los *quanta* de Planck provenían de la materia, al emitir radiación; o viceversa, podían ser absorbidos por ella, también en cantidades discretas o múltiplos enteros del *quantum*. Para Einstein el asunto era más directo: los *quanta* están en la radiación en forma de *granos* o corpúsculos; pero esos granos pueden ser absorbidos por la materia misma, bajo ciertas condiciones. Un caso concreto es el de los electrones en los metales, dando lugar al efecto fotoeléctrico. Para Bohr el asunto es más sencillo todavía, si bien hay que renunciar a una descripción o comprensión de lo que pasa realmente. Los electrones efectúan saltos en sus *órbitas*, a mayores o menores radios, según absorban o emitan esos corpúsculos luminosos. Todo lo que hay que hacer es exigir que el momentum angular de los electrones esté también cuantizado, como los valores de energía de esos granos, y que la energía de cada grano absorbido sea exactamente igual a la que hay en la diferencia entre dos niveles. Todo cuadraba bastante bien, salvo el esquema mental que debe hacerse, ese sí de verdad *un salto cuántico conceptual de dimensión colosal*. Cinco años más tarde Millikan mediría con precisión el valor de la constante introducida por Planck y Einstein; una década después Compton establecería el carácter granular de la luz y de Broglie postularía el comportamiento ondulatorio del electrón.

1.3 Los responsables de la confusión iluminante

Fue en el año 1916 cuando el norteamericano Robert Millikan, tratando de mostrar la falsedad de la hipótesis de Einstein, verificó su acierto. Los cinco personajes de esa primera revolución cuántica ya mencionados (Planck, Einstein, Rutherford, Bohr y de Broglie), al igual que Heisenberg, Schrödinger, Dirac, Born, Jordan, Pauli y varios pioneros más, entre los que se cuentan Millikan, Debye y otros renombrados físicos de esa etapa, quizá la más revolucionaria de la física de todos los tiempos, fueron galardonados con el premio Nobel por sus contribuciones al surgimiento de la nueva teoría. Hoy sigue ocurriendo lo mismo: Serge Haroche y David Wineland justo recibieron la codiciada presea mientras preparaba estas notas, por aislar sistemas cuánticos y preparar el camino a la computación cuántica, un tema al que habrá que volver más adelante.

Max Karl Ernst Ludwig Planck nació el 23 abril de 1858, en Kiel, Schleswig-Holstein, Alemania. Su atrevida propuesta sobre los *quanta*, no por desesperada menos valiosa y revolucionaria, le llevaría a ganar el premio Nobel de física en 1918, un tiempo muy extenso para una contribución sin precedentes a la ciencia, pero comprensible precisamente por lo revolucionario de la idea, la de mayor impacto en el desarrollo futuro de la física al lado de la relatividad; él mismo no se aventuró a hacer interpretaciones de su trascendental acertijo, emparentado necesariamente con la hipótesis atómica, repudiada ésta por los más destacados físicos alemanes. La arena del debate de las nuevas ideas que surgirían habría sido más fácil imaginarla ubicada en Inglaterra o Francia, menos en Alemania. No obstante, ocurrió lo impensable.

Max Planck

Albert Einstein



Figura 1.4. Planck (1858-1947) y Einstein (1879-1955), los mayores responsables de una revolución todavía en efervescencia. www.cienciaficcion.com/cienciaficcion

El siguiente salto hacia la construcción de la teoría cuántica se produjo, como ya lo señalé, cinco años más tarde, mas no en Alemania, y estuvo protagonizado por Einstein, de sangre judía. A diferencia de Planck, Einstein era un desconocido... pero había seguido meticulosamente, desde muy joven, los pasos de aquel y de otro gran físico de su tiempo, Ludwig Boltzmann. Einstein aplicó su hipótesis cuántica a una intrigante cuestión, el efecto fotoeléctrico, al que nos hemos referido en la monografía divulgativa ya mencionada y se volverá en capítulos posteriores. Otros apuntes históricos encontrará el lector en la monografía *Genio entre genios* y en diversos libros de carácter histórico-epistémico que menciono enseguida y recopilo al final. Algunos avances significativos, aparte de los ya mencionados, ocurrieron en el transcurso de las dos décadas siguientes. Pero los resultados teóricos más consistentes de la *cocina cuántica* surgieron con posterioridad a la hipótesis de de Broglie, en menos de un lustro. Ni siquiera los resultados iniciales de Bohr y su explicación de las líneas espectrales del átomo de hidrógeno pueden verse como el logro de una verdadera teoría física, más bien son el resultado de complejos malabarismos.

En 1916 Einstein había concluido su Teoría General de Relatividad y prestó nuevamente atención a lo que se estaba cocinando. Para entonces, los resultados y las posibles explicaciones de lo que ocurre en el núcleo estaban de moda. Einstein vislumbró la similitud entre las transiciones electrónicas en los átomos y los decaimientos en los núcleos radiactivos. Uno de sus mayores éxitos del momento (1917) fue deducir la fórmula de Planck para la radiación del cuerpo negro utilizando solamente ideas cuánticas y sentando los cimientos teóricos de máseres y láseres. Echando mano de las ideas estadísticas de Einstein, Bohr extendió su modelo atómico intentando explicar, no solamente la presencia de las *líneas espectrales*, sino también su intensidad. ¡No tuvo mayor éxito! Lo intrigante del asunto es que se puede hacer una buena predicción estadística con su modelo, pero no se logra saber *la causa última* que ocasiona el decaimiento del núcleo o la desexcitación electrónica, también denominada emisión atómica.

En la búsqueda de la explicación a tantos interrogantes surgió una «ruptura con el principio de causalidad» que de ahí en adelante no dejaría en paz a Einstein. Ese largo periodo histórico se ha cubierto profusamente por los historiadores de la ciencia. Se aconsejan en particular las bien documentadas obras *Quantum generations* (Generaciones cuánticas) e *Historia de la física cuántica*, escritas respectivamente por Helge Kragh (1999) y Jesús María Sánchez Ron (2001). Un ensayo más breve, centrado en uno de los personajes más geniales y controvertidos de esta historia, de gran valor histórico-epistemológico, es el de Antonio Fernández-Mañada: *Ciencia, incertidumbre y conciencia. Heisenberg* (2004). De más reciente y bien documentada fuente el lector encuentra en inglés *The quantum story, a history in 40 moments*, de Jim Baggot (2011).

1.4 Motivación para un "post scriptum"

Sin que sean especialmente novedosas y sin pretender que sean completas, estas notas difieren de las de otros autores alrededor del tema. Antes que nada, es bueno advertir que se apartan de otras en el orden más que en el contenido. En segundo lugar, son diferentes los propósitos que se han tenido en mente al escribirlas. Los párrafos siguientes intentan reflejarlos. En cuanto a lo primero, se ha hecho caso omiso del orden cronológico, es decir, de la historia de aquel primer cuarto de siglo, para centrar la atención en lo que *contemporáneamente* debería subrayarse, de acuerdo con lo ocurrido durante estas últimas 2 décadas. ¡Estamos en el periodo de la segunda revolución cuántica! El lector minucioso podrá ir a los detalles históricos documentados en libros especializados, como los ya citados de Baggot, Kragh, Sánchez Ron, Fernández-Rañada y otros. Añádase a la lista la más importante documentación sobre esa época que se había escrito hasta 1966: *The conceptual development of quantum mechanics*, de Max Jammer.

Lamentablemente la mayoría de los textos que se encuentran en el mercado de habla hispana suelen ser o muy formales o muy laxos o muy históricos, sin que logren cometidos conceptuales importantes. Al final de este capítulo se recomiendan algunas obras divulgativas, dignas de tenerse en cuenta. En los últimos 50 años, particularmente desde 1982, las cosas han cambiado radicalmente en las posibilidades experimentales, sin que se haya avanzado con nuevas teorías; más bien puede afirmarse que finalmente debemos estar dispuestos a aceptar las más dramáticas consecuencias de lo que se *cocinó* en aquellos 30 años desde 1900, durante *la primera revolución cuántica*; los experimentos más rigurosos, de imposible realización en esa primera infancia, finalmente han verificado la validez de sus más extrañas predicciones. Queda por comprobar plenamente lo que se ha observado con la máquina más costosa de todos los tiempos para examinar lo más pequeño, el denominado LHC o gran colisionador de hadrones, por sus siglas en inglés (large hadron collider, en el CERN), en particular el experimento sobre los bosones de Higgs que, aunque van por buen camino, tendrán que esperar hasta 2015 para analizar nuevos rangos de energía. Ello no modificará la teoría cuántica, con toda seguridad la afirmará.

El presente trabajo empezó apenas como un *post scriptum* a otro texto escrito *a varias manos* en 2007, *Nanotecnociencia*, y se revisa ahora como una modesta introducción a la cátedra que destaca *la segunda revolucón cuántica*, con motivo del centenario de *los saltos cuánticos*. A continuación se dan algunas de las razones que se tuvieron para escribir una larga introducción al *post scriptum*, o para decirlo en forma tajante: pergeñar unos prolegómenos con posterioridad a 2

ensayos a varias manos, si incluimos *Unos cuantos para todo* con sus *apéndices discretos*. Quizá el presente texto virtual alcance a llegar a algunos de mis colegas docentes de distintas disciplinas (científicas, tecnológicas, humanísticas y artísticas) y de diversos niveles, incluido el básico secundario (maestr@s de ciencias) y, por qué no, universitario (de quienes espero sus benevolentes observaciones y críticas); a los estudiantes de artes, de ciencias humanas y de otras facultades (a quienes desde ya solicito sus valiosas sugerencias). Valdría la pena que estas notas llegaran también a quienes pueden ser fácilmente víctimas de charlatanes que presumen entender la esencia de la teoría cuántica; tal parece ser el caso de quienes desprevenidamente han visto la película *What the bleep do we know!*[14] No sobra repetirlo de nuevo: más que la historia, se han querido destacar los conceptos. Aquella nos rodea por doquier y afortunadamente continúa su rumbo, gracias precisamente al esfuerzo del ser humano por responderse las interminables preguntas que surgen de respuestas siempre incompletas, de paso contribuyendo con nuevas tecnologías que retroalimentan la posibilidad de formular mejor las preguntas, un proceso interminable.

Lo que en rigor podría llamarse prolegómenos, texto que empezara como *post scriptum*, es decir como apéndice, surgió de dos actividades complementarias: el curso de física «Cuántica para todos y para todo» al que ya se ha hecho referencia, ofrecido como *curso de contexto* a través de la Dirección Académica de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá, (probablemente *curso virtual* en un futuro) y un taller anterior para maestros, patrocinado por el Ministerio de Educación Nacional dentro de las actividades del denominado «Año de las Competencias Científicas», coincidente con el «Año Mundial de la Física». El taller, realizado a fines de 2005, versó sobre «la nanotecnociencia», y sirvió de tema central y embrión del libro a varias manos con el mismo título. El curso de contexto que se ofreció después fue motivado por el taller pero fue más lejos; la acogida que tuvo le ha dado continuidad y facilitó la aceptación que tuvo la cátedra propuesta. Las dos actividades obligaron al autor a diseñar estrategias para comunicar algo que suele mostrarse como inaccesible al no experto: la *fenomenología* cuántica. Se hizo con dos propósitos. El primero, mostrar que los *cuantos* (léase si se quiere *cuanta*: plural castellanizado de *quanta*) tienen que ver *con todos y todas... y con todo*; el segundo, que la tecnología moderna no puede entenderse al margen de la teoría cuántica. En particular, es necesario subrayar que quienes invocan la nanotecnología sin recurrir a la mecánica cuántica, teoría en abierta contradicción con la *lógica clásica*, están desconociendo que: a) la nanociencia, como descripción válida de los fenómenos del mundo submicroscópico, empezó a desarrollarse mucho antes que sus aplicaciones, desde hace ya un siglo; b) esas aplicaciones habrían sido impensables sin el nuevo enfoque científico; c) la química cuántica, ya adulta, y la biología cuántica, todavía en pañales, abren nuevos senderos de exploración a las aplicaciones y a las implicaciones de la fenomenología cuántica. Las consideraciones anteriores, resumidas en el reconocimiento ya

---

[14] Escribe Steven Novella, en el comentario publicado en su página web con el título *Curanderos cuánticos* alrededor de esta película que, dicho sea de paso, ya tiene su *segunda y tercera parte(s)*: "Cuando se intenta convencer a los investigadores en astrología, *mediums* y percepción extrasensorial acerca de la aparente imposibilidad de sus afirmaciones, la forma más sofisticada que tendrán de defenderse será, casi con toda certeza, la de farfullar algo relacionado con la mecánica cuántica". (Véase la página theskepticsguide.org) Volveremos a este espinoso asunto en el capítulo sexto.

centenario de que la ciencia es precursora de la tecnología, no se dieron tan claramente con la tecnología a escala macroscópica de las primera y segunda revoluciones industriales; se dan en la época *postcontemporánea* o *transcontemporánea*. Hoy es prácticamente imposible el avance tecnológico con base empírica. Dos aspectos, la necesidad de la divulgación en términos sencillos para comprender un inmenso rango de fenómenos que nos circundan e involucran (sin que lo percibamos) y las innumerables aplicaciones (e implicaciones, lo reitero) que de ella se derivan, justifican el esfuerzo por poner al alcance de todos los hispano-lectores los aspectos sustanciales de la teoría cuántica.

La teoría cuántica es sustancial para quienes quieran, no solamente entender algo desde la perspectiva científica de lo que pasa por debajo y por encima de la escala habitual en que nos movemos, sino también para tener una vaga idea de cómo funcionan los dispositivos de uso diario en la tecnología moderna. Las propiedades físicas del ADN, punto de partida para la vida misma y su reproducción, la fotosíntesis y otros fenómenos básicos a nivel biológico, no pueden entenderse sin recurrir al formalismo cuántico. Preguntas tales como ¿de dónde venimos? o ¿para dónde vamos? tienen que incluir el nuevo paradigma científico; de lo contrario, se empieza por formularlas mal. Un problema central en la computación clásica (la cuántica por ahora apenas está surgiendo) es el aumento simultáneo de la memoria y la velocidad, a menor costo. El MP3 o 4, el MPEG-5, el iPod nano, el iPhone5 y otras aplicaciones de la nanociencia que ya han dado lugar a premios Nobel, son consecuencia de esta nueva concepción del mundo y sobre la materia, la energía y la información cuánticas. A lo mejor le interese al lector la nota que para **UNperiódico** escribí con otro colega (Jairo Roa) con motivo del Nobel en física en 2007 (Fert y Grünberg): http://www.unperiodico.unal.edu.co/ediciones/107/14.html

A la postre, hay mucho más en la teoría cuántica; la denominación dada al curso de contexto lo sugiere. Se trata, por un lado, de contrarrestar la opinión, generalizada, de que las llamadas teorías clásicas describen el universo macroscópico y que la teoría cuántica está limitada a los fenómenos microscópicos. En el universo de los fenómenos físicos, nada hay mayor que el Universo mismo. Pues bien, en este terreno, el origen de ese universo se suele asociar a un principio cuántico fundamental: el principio de indeterminación. Lo mismo puede decirse de cualquier otro fenómeno. La confusión reinante puede deberse a que la constante fundamental de la teoría, el cuanto (o *quantum*) de acción, es *demasiado pequeña*. Nos apartamos también de la opinión de Bohr, en el sentido de que "no importa que tan lejos los fenómenos (cuánticos) trasciendan el alcance de una explicación de la física clásica, la acumulación de toda evidencia debe expresarse en términos clásicos." (Niels Bohr, *Escritos Filosóficos*.) También las *Ciencias de la complejidad*, la nueva *Termodinámica* y la *Teoría de información* (por ende, las nuevas t.i.c., o tecnologías de la información y comunicación, absurdamente puestas como *panacea* pedagógica) tienen mucho que ver con el *paradigma cuántico*. A esos temas volveremos en otro ensayo.

Se insiste con demasiada frecuencia en que una de las implicaciones más trascendentales del cuanto de acción es la de que la observación afecta toda medida. Por tal razón, a lo mejor un poco ingenuamente, se afirma que si no se requiere invocar los principios cuánticos para todo, es porque, como escribió el británico Paul Audrian Maurice Dirac en el primer capítulo de su monumental obra *Principios de mecánica cuántica*: "Si el objeto considerado es tal que la

alteración límite inevitable se puede despreciar, se dice que el objeto es grande en sentido absoluto; si, en cambio, dicha alteración no es despreciable, el objeto es pequeño en sentido absoluto...”. Más adelante se reafirma esta juiciosa observación, la que conduce al llamado *principio de correspondencia*. Pero...

1.5 Una revolución que continúa siendo molesta

Por lo dicho atrás, Dirac se quedó corto. No solo porque el origen del Universo no es clásico; al menos no podremos imaginarlo sin recurrir a los *quanta*. ¿Habrá algo mayor que el Universo? Como afirma Ramón Lapiedra en reciente ensayo (*Las carencias de la realidad*, Tusquets, 2008): si hoy no dispusiéramos de tan poderosa herramienta, tendríamos que inventarla de algún modo. Los fenómenos colectivos, presentes en muchas de las aplicaciones de lo que se denomina *física de la materia condensada*, es decir, de *trozos de materia* en la que están participando coordinadamente del orden de, para dar una idea, un cuatrillón (la unidad seguida de 24 ceros) de partículas o entes cuánticos concentrados en un volumen no superior a un centímetro cúbico, para todos los efectos un tamaño macroscópico, tampoco tienen una explicación clásica; y si el trozo de materia es mucho menor, hay aún menos razones para esperar que la lógica clásica pueda permitirnos entender su comportamiento.

Pero hay todavía más, como se desprende de cuidadosos experimentos realizados durante las dos últimas décadas: si bien es cierto que la medición o la observación directa, inevitablemente una interacción con el sistema, altera el objeto observado, esa no es la única consecuencia de aceptar los principios cuánticos. Aceptarlos y, sobre todo, materializarlos, ha llevado a lo que muchos reconocen como *la segunda revolución cuántica*. Investigadores de la Universidad de Innsbruck fueron los primeros en conseguir lo que denominan «interaction-free-measurements» (medidas libres de interacción). Parodiando a Einstein, la consecuencia es tajante y, hasta cierto punto, cruel: ¡el sentido común y la sensatez han sido refutados! También la noción misma de realidad... a menos que sea redefinida, o estemos dispuestos a aceptar que es un mito más: Einstein se revolcaría en su tumba. Es aquí donde los embaucadores, siempre tan abundantes y acuciosos o astutos, pueden aprovechar la ocasión para hacer de las suyas.

Algunas frases del párrafo anterior requieren de una explicación para el lector no familiarizado con estos temas. La propuesta de Planck, presentada ante la Academia en 1900, más que respuestas claras, creó más confusiones. Él mismo escribiría 20 años después a un amigo: “Puedo caracterizar el procedimiento entero como un acto de desesperación...” Personalmente Planck, no solamente sus contemporáneos, siguió pensando en términos clásicos. Más abierto a nuevas ideas, Einstein vislumbró, mejor que aquel, el valor intrínseco de la *constante de acción*, puesto que encajaba muy bien en su espacio tetradimensional. Pero le ocurrió lo que al cazador fortuito: mató el tigre y se espantó con el cuero.

Einstein abonó el terreno para continuar cuantizando cantidades físicas. Aunque sus aportes a la teoría cuántica en aquel cuarto de siglo fueron muchos, podría decirse que más tarde se desentendió del asunto... excepto porque él mismo supuso que algunas de las hipótesis eran solo eso: *hipótesis de trabajo*, ideas momentáneamente útiles a las que después se les podría dar una adecuada interpretación, cuando la teoría de relatividad y la teoría cuántica encajaran

perfectamente. En particular, la llamada paradoja EPR (veremos que también es teorema), como el más completo teorema de la desigualdad descubierto por Bell (perfeccionado en una igualdad posteriormente), con la que intentó confundir a Bohr en 1935, es uno de sus últimos esfuerzos significativos por quitarle validez general a la teoría cuántica ya adulta. Transcurridos más de cien años desde cuando cuantizara la radiación, su sueño no se ha hecho realidad. Las nuevas generaciones de físicos se han apartado del escepticismo de Einstein con respecto a la teoría cuántica. La interpretación de la teoría se aleja cada vez más de la prevista por aquel… o las múltiples posibles interpretaciones, para decirlo más exactamente. (Laloë, 2012.)

Hay otros aspectos interesantes, usualmente no discutidos en los cursos de física cuántica para físicos, en su mayoría caracterizados por dejar de lado los aspectos conceptuales, en particular los que tienen que ver con la interpretación; o por evadir preguntas que al menos por ahora carecen de respuesta. ¿Tiene la física cuántica algo que decir acerca de la conciencia? La vida, ¿es un fenómeno marginal a lo cuántico? Aunque someramente, estos y otros aspectos se abordarán, a la luz de recientes experimentos, durante la cátedra y, a lo mejor, en un futuro ensayo con otros colegas del cual por ahora adelantamos el título tentativo: «Quanta, biology and complexity».

Se quisiera ampliar estos y otros temas que van del arte y la filosofía a otros aspectos quizá más esotéricos, no por ello menos apasionantes para los científicos: la ciencia no puede negarse al *diálogo de saberes*. Este ejercicio, practicado con los estudiantes del curso *Cuántica para todos y para todo* (le hemos abreviado CPTPT), procedentes de todas las facultades de la un – Sede Bogotá, ha sido extremadamente provechoso. Su proyección bien podría servir para enfrentar a los charlatanes tipo *curanderos cuánticos*; de paso, para empezar a mirar con el respeto que se merecen las cosmogonías presentes en nuestras culturas ancestrales, otros puntos de vista que deben mirarse con respecto dentro de las lógicas no convencionales. Esperamos que la versión 2013 I de la JCM (acrónimo, si me lo permiten, de la Cátedra Mutis) sirva también para eso, como corresponde al espíritu de las cátedras de sede en la Universidad Nacional.

Para no desviarnos del objetivo central de estas notas, no abordaremos algunos de los temas anteriores en el presente ensayo pero esperamos hacerlo durante la cátedra. Hemos insistido en que durante los últimos años ha surgido un campo revolucionario, conocido usualmente como información cuántica, seguramente más amplio de lo que cabe imaginar. La denominación es confusa. Su importancia es enorme, si se tiene en cuenta que las nuevas t.i.c. echarán mano de sus resultados tan pronto estén disponibles. De hecho, la criptografía cuántica es ya un *hecho* y la computación cuántica podría decirse que está *ad portas*. La teleportación está más lejos.

El impacto de las nuevas t.i.c. en la pedagogía es cada día más grande. Y la ignorancia sobre su origen también. El autor y su grupo están trabajando tangencialmente en el asunto y en otros relacionados (la enseñanza desde la nanoescala es uno de ellos), sobre todo por las implicaciones epistemológicas, ontológicas y gnoseológicas y por su relación con un proyecto más ambicioso de *cambio cultural*. Le hemos denominado «Proyecto ETHOS Buinaima». Para mayor información sobre sus objetivos, remitimos al lector a nuestra página.

1.6 Algunas recomendaciones

Antes de poner punto final a esta primera parte de una no muy breve introducción a un *post scriptum*, vale la pena recomendar algunos libros que, aunque con propósitos diferentes, han salido al mercado y que pueden ayudar a cubrir parcialmente el vacío que se acaba de mencionar. Entre las más accesibles en castellano puedo mencionar estos 4: *Física cuántica para filósofos* (Alberto Clemente de la Torre), *El burro de Sancho y el gato de Schrödinger* (Luis González de Alba), *El enigma cuántico* (Bruce Rosenblum y Robert Kuttner, traducido del inglés; en el idioma original ya está disponible la segunda edición) y *Física cuántica* (Étienne Klein). Este último es un ensayo breve de particular interés. Consta de dos partes: *Una explicación para comprender* (fundamentos sin matemáticas) y *Un ensayo para reflexionar* (debate epistemológico). De la segunda parte, puede obtenerse una versión en pdf.

No puedo dejar de referirme, así sea en forma tangencial, al libro de Ramón Lapiedra, *Carencias de la realidad*. No es solo un sugestivo título: su contenido es retador, para ir más allá de lo convencional, sin perderse en lo formal y sin caer en lo que desde Sokal y Brickmont se denominan *Imposturas Intelectuales*. Allí se analizan juiciosamente desde el teorema de Bell hasta el origen del Universo. Recientemente vino a mis manos un excelente libro divulgativo con un sugestivo título: *How to teach quantum physics to your dog*, de Chad orzel (2010). Otros textos útiles se suministran en la bibliografía, aunque la mayor parte de ellos están, como el anterior, en inglés.

1.8 Si no siente vértigo, es porque no ha entendido

De acuerdo con los expertos más reconocidos, *nadie comprende la mecánica cuántica*.

Se dirá que lo mismo ocurre con la relatividad. Puede afirmarse que muy pocos la entendían antes de 1920. Era una época en la cual los físicos estaban todavía muy aturdidos con la nueva concepción del espacio-tiempo, ya no digamos curvo, pero incluso la que se deriva de la relatividad especial. A explicar y, de alguna manera, divulgar la teoría de relatividad se han dedicado megatoneladas de papel. Aunque no es trivial, haciendo un esfuerzo uno logra entenderla y hacerla asequible a quienes tengan un mínimo interés, acompañado de un poco de paciencia. Esto ocurre, afortunadamente cada vez con mayor frecuencia, sobre todo en círculos de astrónomos aficionados o de *cosmólogos en formación*.

No puede decirse lo mismo de la teoría cuántica. En los últimos años, quizá en la última década, las cosas se han invertido: ahora se escribe más sobre física cuántica, y las referencias tomadas casi al azar en la sección anterior lo atestiguan. Pero la confusión sigue al acecho, en forma por demás peligrosa. Es más: *el cuento cuántico* supera al *canto cuántico* o se desliza a su lado.

El título de esta sección es una cita, casi textual, de uno de los mayores responsables de la teoría cuántica, precisamente el personaje central de la cátedra, Niels Bohr. Como lo señala González de Alba en su libro ya citado, "si no sentimos vértigo ante la mecánica cuántica es que no hemos entendido... sentiremos vértigo al conocer." Podría transcribir una docena y más de citas de famosos personajes, premios Nobel la mayoría, que reconocen sentirse desbordados por esta nueva concepción del mundo. En la presentación del contenido de la JCM 2013 I citaré varios ejemplos.

El siguiente párrafo es ya famoso en la literatura:

> Hubo una época en que los periódicos decían que sólo doce hombres comprendían la teoría de la relatividad... Seguramente fueron más de doce. Por otra parte, puedo afirmar sin riesgo de equivocarme que nadie entiende la mecánica cuántica. (Richard Feynman, *The character of physical law*, Cambridge, MIT press, 1965.)

Feynman, premio Nobel en 1965, murió de cáncer en 1988, hace precisiamente 25 años, y es reconocido como uno de los más profundos expertos en teoría cuántica; su versión de la teoría, elegante, ingeniosa y original, conocida con el nombre de *integrales de camino*, y los diagramas de Feynman, aplicables en problemas de muchos cuerpos, cuando los esquemas convencionales no son suficientes, comprueban el éxito de las *recetas cuánticas* allí donde el sentido común se vuelve impotente. Su aporte más valioso al campo se conoce con el nombre de *Electrodinámica cuántica*. Esta frase suya, tomada casi textualmente, resume la esencia del método (véase capítulo cuarto):

> «El electrón hace todo lo que se le antoja... Va hacia adelante y hacia atrás en el tiempo, sigue todas las trayectorias posibles simultáneamente... Sume todas las posibilidades de lo que puede hacer el electrón y obtendrá con gran precisión el resultado deseado.»



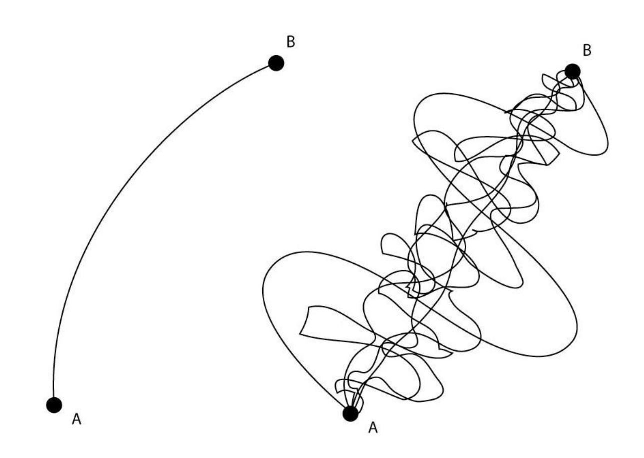


Figura 1.5. a) Richard P. Feynman (1918-1988); b) Esquema del método de las *integrales de camino*: diversas trayectorias seguidas por un electrón cuando va de A a B; la trayectoria que seguirá, mientras no se le observe es la superposición de todas las posibles, es decir, *ninguna*.

La misma opinión que Feynman en el primero de los párrafos citados, han expresado con otras palabras muchos de los pioneros en el campo cuántico. Uno de sus fundadores, Erwin Schrödinger, conocido por la ecuación que lleva su nombre, llegó a decir esta frase, ya citada atrás: "No me gusta, y siento haber tenido alguna vez algo que ver con ello". Einstein por su parte diría cosas como ésta: "Miro a la mecánica cuántica con admiración y recelo"; hasta llegó a afirmar, en los calurosos debates con la escuela de Copenhague que "habría preferido ser zapatero remendón antes que físico," si las cosas fueran como la cuántica sugiere.

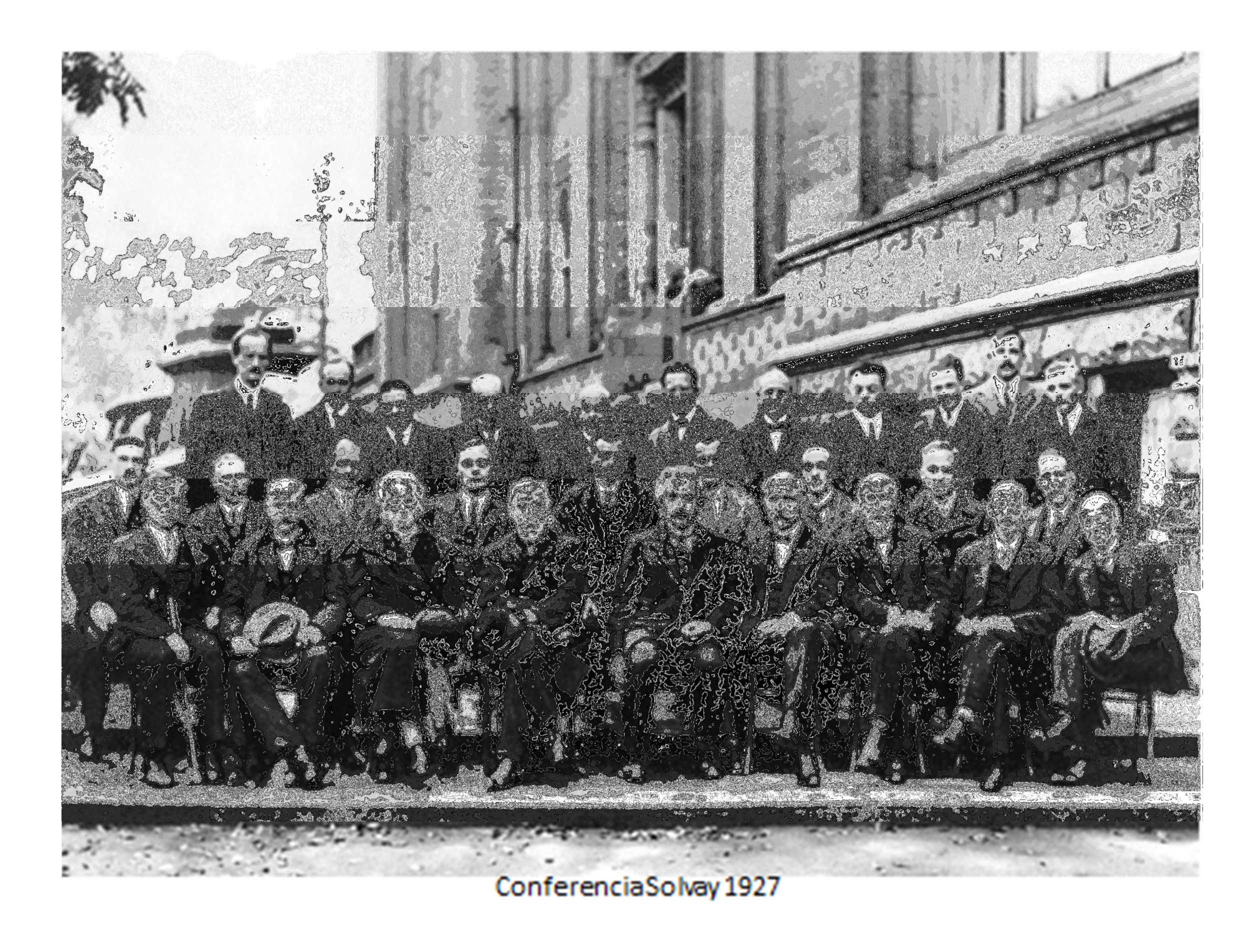
Para que no quepa duda alguna de que las cosas, en términos de la interpretación, no han mejorado mucho desde el famoso Congreso Solvay de 1927, al que nos referiremos después,

puede consultarse un libro reciente, *¿Do we really understand quantum mechanics?*, escrito por Franck Laloë (2012), coautor del descollante texto *Quantum mechanics* conjuntamente con Claude Cohen-Tanudji, premio Nobel de física 1997, y Bernard Diu.

Lo anterior no es para desanimar al lector. He aquí una razón más para intentar, con estas notas, llegar al no experto que quiera conocer la parte conceptual de los fundamentos y prepararlo para que no sienta culpabilidad alguna por no entender la teoría cuántica. Por el contrario, cuando se sienta aturdido con las consecuencias que pueden derivarse de la teoría, es porque está en el umbral de su aprehensión.

Hace ya más de tres décadas, cuando en Colombia seguramente no había aún muchos expertos en el tema *cuántico*, el autor trató de seguir uno de los muchos caminos que se han explorado para *aprehender clásicamente* la fenomenología cuántica. El tema se continúa trabajando aún y cae dentro de lo que se denomina *Electrodinámica estocástica* (SED, por sus siglas en inglés), una *teoría de variables ocultas* de la cual hay muchas variantes. En esencia, el punto de partida es reconocer que existe una radiación de fondo cósmica, lo que ha sido plenamente confirmado, cada vez con mayor precisión. Diseñar instrumentos para su fina detección y descubrir tanto su forma (la típica de un cuerpo negro frío) como su anisotropía fue el mérito principal de los galardonados con el premio Nobel en física en su edición 2006: John C. Mather y George F. Smoot. Luis de la Peña Auerbach, uno de nuestros invitados a la cátedra, es quizá en América Latina quien mayores aportes ha hecho al tema de la SED. Después de los experimentos de Alain Aspect (1982) y muchos más, que confirman plenamente la incompatibilidad de las *variables ocultas locales* con la teoría cuántica y le dan fortaleza a las conclusiones más inesperadas de esta última, no queda alternativa alguna: o se renuncia a *completarla*, aceptándola tal como es y abandonando el camino de la interpretación provisional, o se encuentra otra teoría que la falsee. Ante la imposibilidad, por ahora, de la última opción, el autor ha optado por la primera, aunque no entienda el sentido de sus más polémicas predicciones.

Por aquella época, la del experimento de Aspect, se escribió una obra divulgativa a la que ya he hecho alusión y la cual vale la pena recomendar nuevamente al lector: *En busca del gato …* Declara su autor haber sido motivado por los muchos textos de mala calidad que para entonces se encontraban en el mercado, y rescata el valor de otra obra divulgativa muy difundida, también recomendable: *El tao de la física*¸ de Fritjot Capra, una excelente obra, aunque no desprovista de propósitos místicos, gravemente deformada por charlatanes de todos los colores, recientemente vertida a una nueva edición. Espero contribuir con estas notas a lo que Gribbin propone.



ConferenciaSolvay 1927

Quinta Conferencia Solvay

Las conferencias Solvay fueron establecidas y financiadas por Ernest Solvay un exitoso industrial formado en química. Las más famosas fueron la primera y la quinta. Esta última en particular, durante la cual fue tomada la fotografía adjunta, se hizo famosa porque en ella se desarrolló un histórico debate entre Bohr y Einstein, del cual salió airoso el primero. Se impuso así la denominada *Interpretación de Copenhague*.

En la fotografía se ven, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: (fila superior) A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, Ed. Herzen, Th. de Donder, E. Schrödinger, E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R.H. Fowler, L. Brillouin; (fila del medio) P. Debye, M. Knudsen, W.L. Bragg, H.A. Kramers, P.A.M. Dirac, A.H. Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niel Bohr; (fila inferior) I. Langmuir, Max Planck, Marie Curie, H.A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, Ch. E. Guye, C.T.R. Wilson, O.W. Richardson. Casi todos ellos fueron galardonados con el premio Nobel, en física o en química.

Capítulo Segundo

Conceptos básicos clásicos y cuánticos

2.0 Introducción pertinente

¿Qué parte de la física clásica es indispensable para entender la física cuántica? Difícil pregunta, de respuesta pertinente para quienes no han tomado cursos previos de física. Podría afirmarse que la primera nos crea barreras que nos dificultan captar el significado de la segunda. Después de escribir el material para este capítulo, debo reconocer que la mayor parte del mismo no es indispensable. Rescato lo que se dice sobre energía, por razones que saltarán a la vista cuando se escriba, sin deducción y mucho menos aplicación a problema alguno, la ecuación de Schrödinger. Ella no será, sin embargo, el tema central del curso.

De la lectura del capítulo, debería quedar clara al menos la diferencia radical que existe en la física clásica entre el comportamiento usual de los corpúsculos y el de las ondas. Este, el más extenso de los capítulos, contiene lo bastante como para apreciar esa diferencia y, por lo que acabo de decir, mucho más. ¿Por qué apreciar tal diferencia es tan importante? Precisamente porque en el fondo lo que dio origen a la mecánica cuántica fue el descubrimiento de que en una enorme cantidad de experimentos de fácil realización hoy en día, la luz, una onda, se comporta como un haz de partículas y viceversa, un haz de electrones, cada uno de ellos un corpúsculo hasta donde cabría imaginarlo una vez se le descubrió, se comporta como una onda. Pero eso no es todo: las vibraciones que se propagan en los sólidos, ondas sonoras, están cuantizadas: son paquetes de energía denominados *fonones*. Por otra parte, los átomos, las macromoléculas, los virus y, yendo hacia arriba, otros objetos no tan diminutos manipulables hoy gracias a la nanotecnociencia, bajo ciertas circunstancias se comportan como ondas. Hay muchos otros efectos cuánticos que no tienen análogo clásico, pero de ello no hablaremos a lo largo de este capítulo, ocasionalmente lo mencionaremos.

Tal vez no podamos decir todavía cuáles son los constituyentes básicos de la materia. La materia, en términos modernos, está compuesta de dos tipos de partículas: fermiones y bosones. El electrón es un ejemplo de la primera categoría y el fotón de la segunda. La diferencia esencial en el comportamiento a nivel de la estadística (cuántica), que es lo que importa, cuando se estudian los estados permitidos, se discutirá en el siguiente capítulo. Lo que podemos afirmar, sin duda alguna, es que unos y otros, bosones y fermiones, tienen el comportamiento dual a que nos hemos referido: exhiben en ocasiones propiedades de ondas y en otras más características de corpúsculos. El helio líquido, estado que alcanza ese gas noble a temperaturas extremadamente bajas, es el primer ejemplo que tenemos de *líquido cuántico*. En ese estado cada uno de los átomos es un *bosón*. *Condensado de Bose-Einstein* es el nombre que se le da a ese y otros sistemas atómicos y moleculares que exhiben extrañas características (superfluidez para el caso) imposibles de describir clásicamente.

Vayamos una vez más a los orígenes de la mecánica cuántica. Los rudimentos de la física cuántica no requieren de la termodinámica, mas aunque parezca contradictorio fue esta última la que reveló dramáticamente las tremendas contradicciones existentes en la electrodinámica de los medios materiales al predecir equivocadamente el espectro de radiación divergente (*catástrofe del ultravioleta*) en la interacción de la radiación con la materia. La física estadística nos ayuda a establecer y explicar el comportamiento de un número muy grande de partículas. La ley de distribución de la energía, ley que determina la probabilidad de estados con base en la energía, establecida por Boltzmann clásicamente, discretizada por Planck *en un acto de desesperación*, fue crucial para que este último ajustara la curva experimental a una ecuación matemática: el espectro de radiación de un cuerpo negro. La fórmula de radiación de Planck, como se la conoce, se aplica a objetos macroscópicos, incluido el universo entero (*radiación cósmica de fondo*); no obstante es el primer resultado de la física cuántica, aplicable ésta a objetos del mundo microscópico.

El formalismo clásico no sirve de mucho a la hora de establecer los principios esenciales de la física cuántica. Pero hay principios bien conocidos en la física clásica que siguen siendo válidos en la nueva física. Es más, a los principios de conservación de la energía y de los momentos (lineal y angular) se agregan en la nueva física muchos otros principios de conservación.

La segunda ley de Newton es la piedra angular de la mecánica. Las otras dos, su complemento. Estas últimas tienen su equivalente cuántico, no así la segunda, la más determinista del determinismo mecanicista. No obstante, el principio de correspondencia establece la validez de la ley de movimiento en el límite clásico.

Por otra parte, la electrodinámica admite generalizaciones en el formalismo cuántico que dan lugar a la más precisa teoría física jamás concebida: la electrodinámica cuántica. Cabe agregar que en el terreno práctico, para muchos propósitos, se hace una útil combinación entre la mecánica cuántica y el electromagnetismo clásico conocida como aproximación semiclásica. Aproximaciones semiclásicas, en donde se combinan principios cuánticos y formalismos clásicos o viceversa, abundan por doquier en las aplicaciones de la física cuántica a diversos sistemas.

Por otro lado, el paso del comportamiento puramente cuántico al puramente clásico es difuso. Podría decirse que los dos extremos están lejos del intermedio semiclásico. Es claro que nuestro comportamiento y el de la mayor parte de los objetos que nos rodean es clásico. "Quiero creer que la luna está ahí aunque no la esté mirando", fue el *clamor* de Einstein cuando intentó en 1935 poner en apuros a Bohr con la famosa paradoja EPR (Einstein, Podolski y Rosen), también denominada teorema EPR (véase capítulo sexto). La Luna está ahí aunque no la miren: eso creen, de seguro, los enamorados de todos los tiempos. Y así es, ¿o no?

Sobra repetir que este capítulo es opcional para todos los lectores. Aunque se recomienda a quienes no han tomado cursos previos de física, puede ser la ocasión para repasar algunas nociones ya aprendidas para quienes sí lo han hecho. No es necesario abordarlo todo en una primera lectura; es más, casi todas las secciones resultan en la práctica independientes. Aprovecho, pues, el carácter virtual de este ensayo para extenderme más de la cuenta. Confío en que el esfuerzo resultará provechoso para todos.

2.1 Conceptos y preconceptos

Supone el autor, y en parte puede ser cierto, que el lector tiene algunos *preconceptos* cuánticos, de la misma manera que maneja otros clásicos. Los preconceptos pueden estar equivocados, pero generalmente ayudan; la construcción de los conceptos es un proceso que prácticamente no termina; el cambio conceptual de lo clásico a lo cuántico es arduo y complejo. Si la formación en física del lector de este ensayo va más allá de los preconceptos clásicos, este capítulo puede dejarlo de lado. Dos conceptos deben quedar claros y son el mayor propósito de este extenso capítulo: el concepto de partícula (corpúsculo, para los propósitos de este ensayo) y el concepto de onda, y por supuesto la diferencia que existe a nivel clásico entre uno y otro. Es deseable que quienes asistan a la cátedra conozcan las propiedades básicas de las ondas materiales y de los granos de materia en el terreno clásico para que aprecien mejor el comportamiento dual cuántico, y es lo que intentaremos. La luz no es una onda material; desde la perspectiva *moderna* o postmoderna, está constituida por granos; en otras palabras, *es una onda de energía*, si se le compara con el electrón que en el lenguaje de de Broglie es *una onda de materia*. El concepto de de Broglie ha sido revaluado: hoy se habla, como veremos, de función de onda.

Alguna noción se adquiere, desde la formación media y con la experiencia sensible, sobre espacio y tiempo, corpúsculo, masa y carga, movimiento y energía, posición, velocidad o rapidez (magnitud de velocidad); apelaremos a esas nociones básicas, sin mayor exigencia. Para entender sin ambigüedad referencias a aceleraciones, interacciones o fuerzas, vibraciones u oscilaciones y ondas, conceptos más complejos, requeriremos algún refuerzo. Campos eléctricos y magnéticos y, por ende, ondas EM (electromagnéticas) son conceptos más abstractos. En este capítulo intentaremos introducir al lector que lo requiera al menos a la terminología. No requeriremos de muchos otros conceptos que se manejan en la física de los objetos macroscópicos.

Estado, *paquete de ondas*, *colapso de la función de onda*, *superposición*, *observable*, *operador*, *espín*, *espacio de Hilbert*, *no localidad*, *tunelamiento*, *enmarañamiento* o *entrelazamiento* y muchos más que vendrán más adelante, son conceptos y entidades matemáticas propios del campo cuántico; se explicarán o definirán en términos simplificados a su debido tiempo, sin complicaciones ni pretensiones mayores, procurando no confundir ni crear ambigüedades. *Interferencia* es una propiedad característica de las ondas y va a ser una noción básica en física cuántica; *coherencia* y su opuesto, *decoherencia*, también. Aunque creamos saber qué se entiende por *aparato de medida*, *realidad objetiva* y otros términos aparentemente comunes, veremos que en el dominio cuántico hay que redefinirlos. No sobra insistir en que la teoría cuántica, probablemente más que cualquier otro campo de la ciencia, no solamente es contraintuitiva, en rigor va contra el sentido común. Muchos de sus resultados, precisos, son inesperados, como lo son las conclusiones que de ellos se derivan.

La física es una ciencia teórico-experimental. Los conceptos se construyen a partir de observaciones experimentales. Ilustraremos esto con algunos experimentos, conceptos y modelos clásicos que se elaboraron para el electrón y el átomo en la época precuántica.

Hay una premisa fundamental, común a los dos campos, clásico y cuántico, que puede servir como punto de partida: el resultado de una *medición* es siempre un número o un conjunto de

números *reales*. Ello es, por un lado, consecuencia de la cuantificación que se le exige a una ciencia matemática-experimental ("formalismo matemático que describe adecuadamente las observaciones experimentales"): eso es la física; por el otro, resulta del carácter clásico de la observación. La física, cualquiera que sea, se ocupa de predecir el valor de cantidades que se pueden medir o determinar, directa o indirectamente o, a partir de observaciones y mediciones cuidadosas, establecer reglas cuantitativas, formular leyes precisas en un lenguaje matemático, lo más generales que sea posible, sobre los fenómenos físicos... los de la realidad sensorial (así los *sensores* sean sofisticados instrumentos), para decirlo de alguna manera.

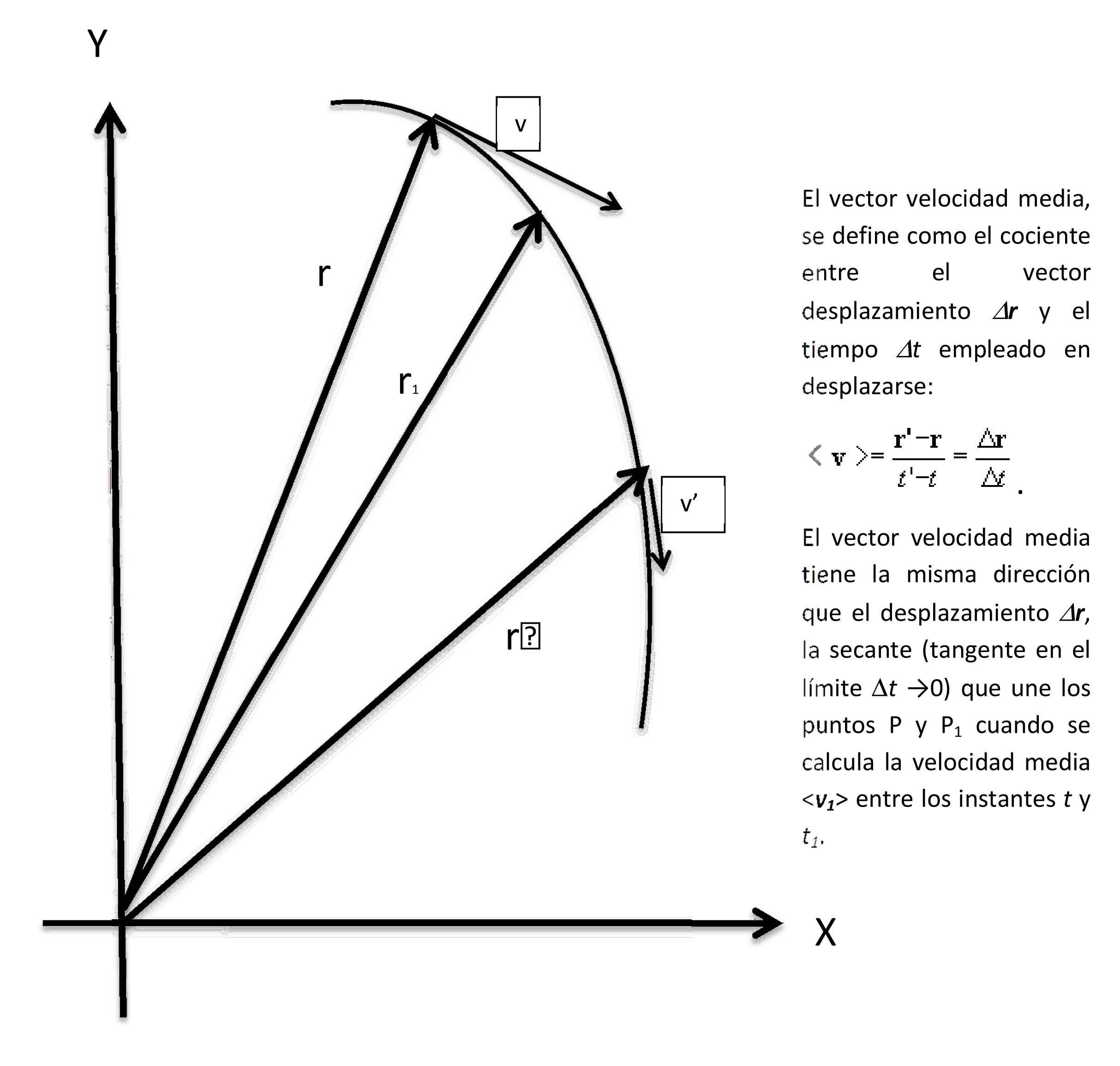
Una cantidad física es objeto de predicción y por ende, aunque sea solo en principio, de medición, cuando es *observable*. Una vez que se conoce su valor, un conjunto de números reales, puede decirse en qué *estado* se encuentra el sistema físico (o se encontraba, porque puede ocurrir que inmediatamente después de la observación o medición haya cambiado de estado). Los instrumentos con ayuda de los cuales *se observa* son extensión de los sentidos. Es el cerebro, en últimas, quien *interpreta*. Solía suponerse que de eso puede encargarse a la teoría, pero no es así. Aunque la teoría cuántica en esencia está completa, el problema de la interpretación se vuelve en la práctica un problema personal.

Parafraseando a Carlos E. Maldonado, complementando una frase suya del capítulo segundo de *Nanotecnociencia*: los fenómenos mesoescalares (léase microscópicos) no son objeto de representación ni de percepción sensorial directa, como tampoco lo son los fenómenos a escala atómica o subatómica, en el dominio de las partículas elementales. Hay un punto más delicado aún, igualmente mencionado atrás: el aparato de medida (ente clásico) influye en el resultado que se obtenga, independientemente de qué tan preciso sea aquel, o mejor, la influencia es más fuerte en la medida en que se le exija al aparato una mayor precisión, particularmente a escala atómica o subatómica. Ésta es una parte esencial del principio de indeterminación, al cual ya nos hemos referido, enunciado por Werner Heisenberg en 1927. Pero, como también se afirmó arriba, no lo es todo: se pueden hacer *observaciones libres de toda interacción*.

Se suministra a continuación un ejemplo recurrente de aplicación del principio de incertidumbre en el sentido usual cuántico, no sin antes definir algunos conceptos elementales clásicos (o preconceptos) con cierto grado de precisión. A lo largo del capítulo ilustraremos mejor esos y otros preconceptos.

La velocidad, una cantidad clásica vectorial que se suele designar por $\boldsymbol{v}$ o $\boldsymbol{V}$, es la evolución con el movimiento de la posición de un objeto: es el cambio de posición en el tiempo. Evidentemente, es una cantidad *referida a un determinado observador*, es decir, **relativa**. La Tierra se mueve con respecto al Sol, pero no podemos decir lo mismo respecto a nosotros, al menos cuando estamos *anclados* a ella. La posición *exacta* suele darse por simplicidad, aunque no siempre, por las llamadas *coordenadas cartesianas* de un punto matemático (x,y,z) y suele representarse por el vector (tridimensional) $\boldsymbol{r}$; en ocasiones es mejor hacerlo mediante las denominadas coordenadas esféricas (r, θ, φ), siendo r la magnitud del vector de posición, $\boldsymbol{r}$, pero no es necesario ahondar en el tema. La medida de la rapidez promedio, magnitud de la velocidad promedio $<|\boldsymbol{v}|>$ (o $<v>$), es la relación entre el desplazamiento o espacio recorrido (s), denotémoslo por Δs, y el tiempo (t)

empleado para recorrerlo, designémoslo por *Δt*: <*v*> = *Δs/Δt*. El espacio recorrido depende del intervalo de tiempo medido. Asumimos que en *t* la posición es ***r***, en t_1 $\boldsymbol{r_1}$ y así sucesivamente: en *t′* es ***r′***. Limitémonos, por simplicidad, al plano XY para ilustrarlo.



El vector velocidad media, se define como el cociente entre el vector desplazamiento ***Δr*** y el tiempo ***Δt*** empleado en desplazarse:

$$\langle \mathbf{v} \rangle = \frac{\mathbf{r'} - \mathbf{r}}{t' - t} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}.$$

El vector velocidad media tiene la misma dirección que el desplazamiento ***Δr***, la secante (tangente en el límite $\Delta t \to 0$) que une los puntos P y P_1 cuando se calcula la velocidad media <$\boldsymbol{v_1}$> entre los instantes *t* y t_1.

El símbolo *Δ* a menudo se emplea para indicar que se hace referencia a cantidades minúsculas. Esto es muy conveniente, porque se pueden, en principio, observar los cambios que se producen de un *instante* de tiempo al *siguiente*, sin precisar el lenguaje: aceptemos, sin más, que el tiempo *fluye* en forma continua; y que la línea (curvada o no) que representa la *trayectoria* (cuánticamente esta última cantidad *no tiene sentido*) es una sucesión continua de puntos. Si no cambia(n) alguna(s) de las componentes de la posición del objeto, no hay movimiento.

Estas preconcepciones han sido objeto de precisiones matemáticas y dieron lugar al cálculo diferencial (e integral), pero por ahora no introduzcamos complicaciones innecesarias. Las

unidades para la velocidad en el sistema MKSA (metro·kilogramo·segundo·amperio) son *m/s* (metros sobre segundo), o mejor, ms^{-1}.

Cuando la velocidad cambia con el tiempo (por ende, a lo largo de la trayectoria), para describir ese cambio se recurre a la aceleración. El poder del cálculo diferencial para describir ese cambio en forma rigurosa se une al gran descubrimiento de Newton de que para ese cambio, para que haya aceleración, se requiere de fuerzas. Para un cuerpo de masa *m* que parte de una cierta posición con determinada velocidad, la trayectoria está perfectamente determinada a partir de las fuerzas que actúan sobre él. Lo más maravilloso de las leyes de Newton, en particular de la segunda, es que nos permite predecir o anticipar la trayectoria, mejor aún, manipularla a voluntad, como se hace en el caso de los cohetes espaciales. Veremos que basta con observar el movimiento circular para entender la esencia de ese maravilloso poder predictivo en los casos que nos interesan.

Dinámicamente, más que a la simple velocidad, tiene más sentido referirse a la cantidad de movimiento o *momentum*, $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, donde *m* es la masa del objeto físico cuyo movimiento se está describiendo matemáticamente. Recuérdese que la masa de un objeto es la medida de su inercia. No es ni de lejos *semejante* o *equiparable* el esfuerzo (rigurosamente *impulso*) requerido para detener un pesado camión con doble remolque cuando está avanzando, así sea muy lentamente, que parar una pelota de tenis *impulsada* con la mayor rapidez que sea posible en un juego real, en el aire; así que la rapidez (o velocidad, si se especifica la dirección del movimiento) no es lo más importante desde el punto de vista dinámico. Si se tiene en cuenta que, de acuerdo con la teoría de relatividad, la masa de un objeto crece con su rapidez, hay una razón adicional para referirse, no a la velocidad, sino a la cantidad de movimiento (momentum), cuando quiere hablarse de la cantidad física fundamental desde el punto de vista dinámico. El *impulso*, efecto de una fuerza actuando durante un intervalo de tiempo ($F\Delta t$, en magnitud), es su contraparte, pues se manifiesta en un aumento (o disminución) del momentum ($F\Delta t = \Delta p$), de acuerdo con la segunda ley de Newton, a la que se volverá en breve. En física clásica afirmamos que el estado de una partícula se describe dando su posición ($\mathbf{r}$) y su cantidad de movimiento ($\mathbf{p}$) o velocidad ($\mathbf{v}$) en cada instante de tiempo. Si lo logramos hacer en instantes sucesivos, estamos describiendo lo que se denomina *trayectoria*. Para ello requerimos de una cantidad física adicional: es la **fuerza**, una cantidad vectorial que en español, inglés y otros idiomas indoeuropeos se suele denotar por ***F***.

F pierde sentido, rigurosamente hablando, cuando pasamos al dominio cuántico. Pero intentemos dar una noción vaga de ese ente clásico: es demasiado importante en la fundamentación de la *mecánica* y del *mecanicismo*. Una aspiración de la física actual es la *unificación de todas las fuerzas*, o de todas las interacciones, para decirlo más precisamente. Interacción va a ser un término más preciso que el de fuerza, incluso lo es en la terminología de las ciencias sociales. A propósito, un término como *fuerza social* no está definido físicamente. Habrá escuchado el lector más informado que hoy en física se habla de solo tres interacciones: fuerte, electrodébil y gravitacional. La electrodébil resultó de la unificación de dos fuerzas o interacciones que antes imaginábamos separadas: la interacción débil y la interacción electromagnética. A su vez la electromagnética es consecuencia de la unificación de los fenómenos eléctricos y magnéticos. ¡Quién hubiera imaginado hace dos siglos que el magnetismo o *los campos magnéticos* y la

electricidad o *los campos eléctricos* son resultado de lo mismo: la interacción debida a una propiedad intrínseca de cada partícula elemental denominada *carga*! Es más: decimos que esa interacción está *mediada* por *fotones*, una entre varias clases de partículas denominadas *bosones*. Pero estamos hilando demasiado fino para la mayoría de los supuestos lectores de este ensayo (a lo mejor el lector promedio del mismo no es el tipo de lector que imaginé al escribir estas notas). En una de las conferencias se volverá al tema de las interacciones y las partículas *elementales*. Regresando a la vieja terminología de las fuerzas, en la práctica de nuestro *mundo cotidiano* basta con dos, la gravitacional y la eléctrica (o electromagnética), y serán suficientes para introducir las nociones que requerimos por ahora. La primera es la más *desconocida*, aunque sea la más antigua o supuestamente mejor estudiada en la historia de la ciencia moderna: arrancó con ella. Así que no nos cuesta mayor esfuerzo imaginar un *campo gravitacional* (véase la figura 2.1), aunque los *gravitones*, sus supuestas *partículas mediadoras*, no hayan sido detectados.

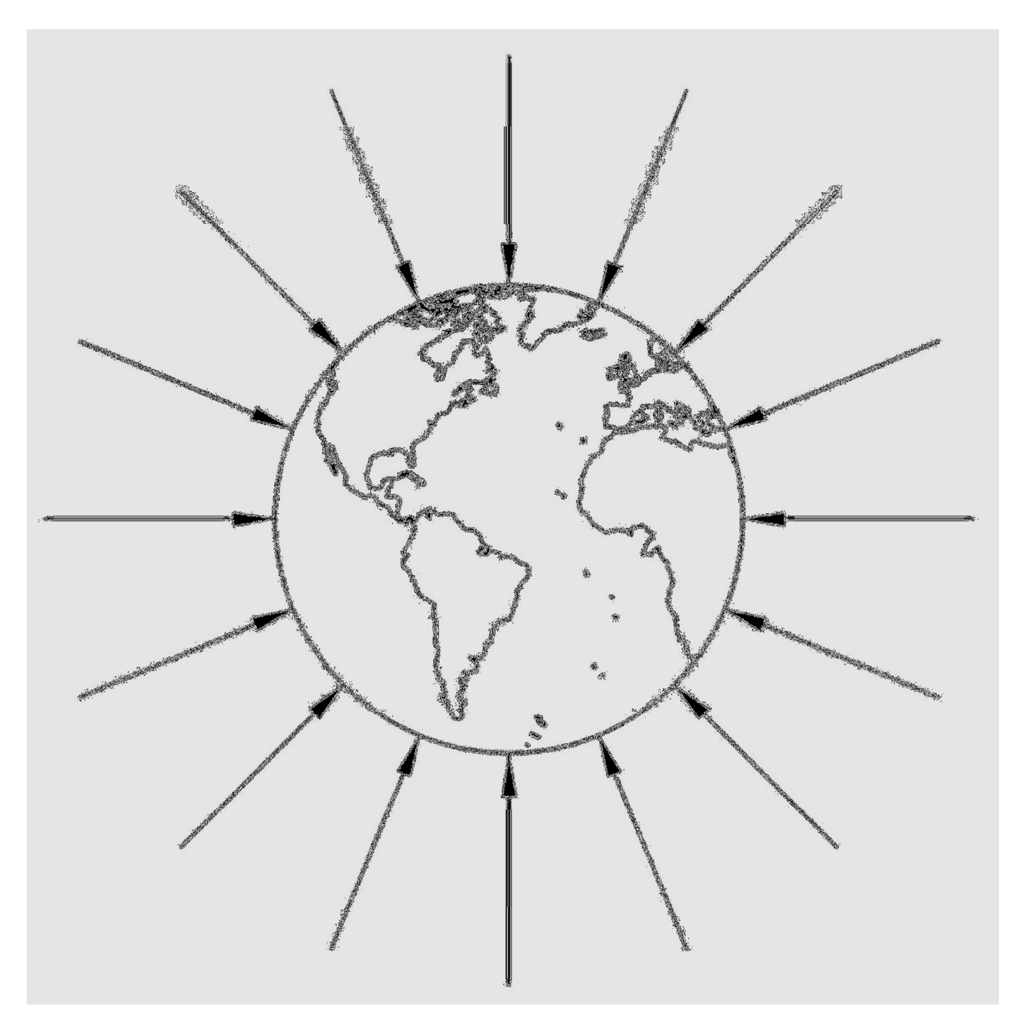
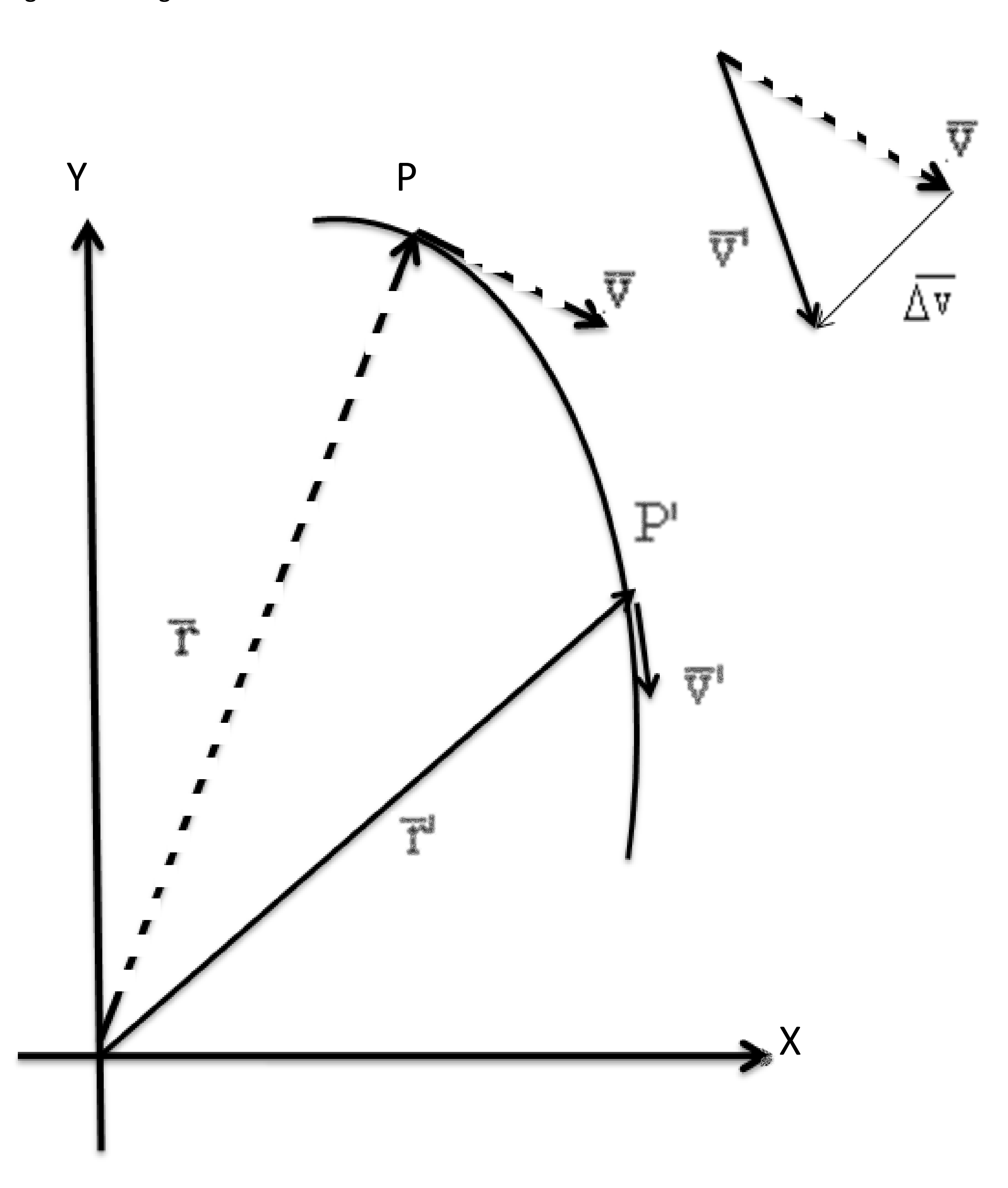


Figura 2.1. Campo gravitacional debido a la Tierra. Se ilustran las denominadas *líneas de campo*. Volveremos a la noción de campo más adelante.

Volvamos a las fuerzas clásicas. El peso es la manifestación de la fuerza gravitacional. Por eso el peso de un cuerpo, a diferencia de su masa, es diferente en la superficie de la Luna que en la de la Tierra. Las fuerzas en resortes, cuerdas, planos inclinados, poleas, la denominada fuerza de rozamiento, viscosidad, cohesión y muchas otras fuerzas *empíricas* son de origen eléctrico. Lo importante, desde el punto de vista de la mecánica newtoniana, es que toda fuerza (léase toda interacción) produce un cambio en el movimiento, es decir, causa una aceleración. Ésta es el cambio de velocidad en el tiempo, exactamente en la misma forma en que velocidad es el cambio de posición en el tiempo: ***a*** es, pues, un vector: **vector aceleración**. Precisemos un poco más, siguiendo la figura.



Si en el instante t el objeto móvil se encuentra en P y tiene una velocidad ***v***, cuya dirección es tangente a la trayectoria en dicho punto, como ya dijimos, y en el instante t' el móvil se encuentra en el punto P' y tiene una velocidad ***v'***, en general ese objeto habrá cambiado su velocidad tanto en módulo como en dirección en una cantidad dada por el vector diferencia $\Delta \mathbf{v}=\mathbf{v}'-\mathbf{v}$.

Utilicemos la figura para ilustrar de paso la *composición* o suma de vectores, un concepto muy importante cuando hablemos, en el capítulo cuarto, de *vector de estado*, aunque estos no tienen representación en el espacio que denominamos real. En el esquema lo que se ilustra es la diferencia entre los vectores ***v'*** y ***v***. Para calcularla gráficamente, se trasladan paralelamente las dos *flechas* y se une cabeza con cabeza, o lo que es equivalente, la cola de –***v*** con la cabeza de ***v'***. Esto es equivalente a invertir la dirección del segundo vector para obtener lo que queremos: ***v'*** - ***v***. (Al trasladarlo al diagrama de velocidades, el dibujante cometió un error que el lector puede corregir. Si lo hace cuidadosamente, verá que Δ***v*** tiene dos términos: uno debido al cambio en la dirección, o *radial*, y otro debido al cambio en la magnitud o *tangencial*.)

Se define la aceleración media como el cociente entre el vector cambio de velocidad Δ***v*** y el intervalo de tiempo $\Delta t=t'-t$, en el que tiene lugar dicho cambio: $\langle \mathbf{a} \rangle = \Delta \mathbf{v}/\Delta t$. La aceleración instantánea ***a*** se define mediante un proceso de límite que para esta breve introducción no nos interesa precisar. La aceleración lleva la dirección del **cambio de velocidad**. Lo más importante que debe tener en cuenta quien quiera aplicar estas nociones a problemas prácticos es que al sumar las diferentes fuerzas que actúan sobre un cuerpo utilizando la técnica de suma de vectores que hemos indicado, el resultado es una aceleración que va en la dirección del vector **fuerza resultante** o **fuerza neta**. El resultado preciso está contenido en la denominada **segunda ley de Newton**. Sin que nos molestemos en precisarlo mejor, en general para un objeto que tiene en cierto momento una cantidad de movimiento ***p*** se puede enunciar así de simple: $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$, para quienes no se dejen arredrar por el símbolo de derivada. Estamos utilizando la notación del cálculo diferencial, una herramienta utilizada (*inventada* o mejor, descubierta) por Newton, aunque introducida también simultáneamente por Leibnitz.

Hay otra cantidad que depende de la rapidez, o mejor del momentum: es la *energía de movimiento*, conocida usualmente como energía cinética, expresable en términos newtonianos modernos mediante la fórmula $p^2/2m$ (o, si lo prefiere, $½mv^2$; eso no es cierto cuando hay que tener en cuenta la relatividad de Einstein, cuando se reconoce la equivalencia entre masa y energía). Para aprovechar una analogía con el concepto de impulso, de gran trascendencia, nótese que la extensión de la fuerza en el espacio, $F\Delta x$ para el caso *unidimensional*, conduce al concepto de trabajo y por ende al de aumento de la energía (o de disminución, si la fuerza va en dirección opuesta a la del movimiento): $F\Delta x$ es el aumento en la energía de movimiento, si no hay otra fuerza que se oponga a éste y aquella actúa en la dirección x; o de manera general, el trabajo de la fuerza neta (resultante de la composición vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre el objeto) es igual al incremento en la energía cinética; $F\Delta x$ incrementa además la energía de posición, llamada también potencial, si un campo de fuerza conservativo, por ejemplo el campo gravitacional, o una fuerza elástica (procesos reversibles, caso de un resorte en condiciones ideales) contrarresta la acción de la fuerza aplicada por un agente distinto al campo o al medio

elástico. Imagine, para el caso, un montacargas que levanta o descarga pesados bultos a lo largo del eje vertical, *y*; para elevar un peso *mg* (*m* es la masa, y *g* es el valor de la aceleración de la gravedad en la posición en que se encuentra el montacargas; *mg* es la magnitud de la fuerza gravitacional, denominada peso) a una altura *y*, el montacargas realiza un trabajo *mgy*, cantidad que es precisamente la energía potencial almacenada por el cuerpo, gracias al montacargas.

Interrumpamos la argumentación para señalar desde ya que, contrario a lo que ocurre clásicamente, el aumento o disminución de energía de un ente cuántico en general no puede darse en forma continua, al contrario de lo que hemos supuesto en el párrafo anterior. Se recurre a la imagen de *escalones* para ilustrarlo.

La energía de posición es un término bastante amplio; es *energía almacenada*, de ahí el adjetivo de *potencial*, más general que "de posición". Un satélite moviéndose alrededor de la Tierra tendrá una energía potencial gravitacional. Pero ¡cuidado!, ya no es *mgh*, es proporcional a *-1/r*, donde *r* es la distancia del satélite al centro de la Tierra; el hecho de que sea negativa sirve para ilustrar que la *potencialidad* se toma siempre referida a un punto. Así como en el caso aproximado, cuando el objeto se mantiene muy cerca a la superficie de la tierra, manteniéndose *r* prácticamente constante, se suele tomar como referencia precisamente la superficie de la tierra, en el caso de un satélite suele tomarse *el infinito* como referente: el punto de referencia es completamente arbitrario, pues lo que importa en realidad es la variación en la posición.

La energía potencial puede estar almacenada en muelles comprimidos o en mecanismos menos fáciles de identificar; en nuestra escala usual, envuelve a menudo energía eléctrica (a veces llamada electroquímica) o electromagnética o en últimas se reduce a ella (la del muelle es en rigor de origen eléctrico o electromagnético); quien esté familiarizado con circuitos eléctricos, puede pensar en un resonador u oscilador eléctrico, en el que se acumula o aprovecha energía electromagnética. Un oscilador mecánico, cuyo ejemplo más sencillo es el péndulo simple o la masa atada a un resorte, sirve también para ilustrar el concepto de transformación permanente de energía de movimiento en energía de posición y viceversa. El movimiento planetario es un típico movimiento de conservación y transformación de energía, de potencial gravitacional en cinética o de movimiento y viceversa: en el apogeo, mayor distancia al centro atractivo, el planeta (o satélite) se mueve con menor rapidez que en el perigeo, por lo que su energía cinética (siempre positiva) es menor justamente en la cantidad en que se ha aumentado la potencial, siempre un número negativo para el caso, haciendo de la suma una constante. Para un resorte, caracterizado por una *constante elástica k*, la energía potencial puede escribirse en primera aproximación como $½kx^2$, siendo *x* el desplazamiento con respecto a la posición de equilibrio del muelle. *El módulo al cuadrado* (observe que el desplazamiento *x* podría ser negativo en el caso del resorte, pero x^2 siempre será positivo) es característico de muchos términos que expresan la energía; veremos que esa magnitud también caracteriza otra cantidad física *fundamental* en la nueva física, la *probabilidad*.

Se suele representar a la energía de movimiento por *T* (no confundir con temperatura, una cantidad física muy importante a la que prácticamente no nos referiremos a lo largo de este ensayo) y a la de posición por *U*. En los *sistemas mecánicos* que *no disipan energía* (no hay

cambios de temperatura), decimos que ésta se conserva: *E = T + U = constante*. Son *sistemas conservativos*. Uno de los casos más sencillos es el de un satélite que se mantiene en una órbita, determinada precisamente por la energía *E* y la forma particular en que se le puso en órbita (*condiciones iniciales*); ocurre algo parecido con un electrón ligado al protón (átomo de hidrógeno); pero, como hemos dicho, en éste caso no se puede hablar de órbitas; cuando más, de *orbitales*, solamente para hacer referencia a lo que en un lenguaje riguroso habrá que denominar *estados cuánticos*. Cuando el sistema no es conservativo se habla de disipación de la energía.

Hay otras formas de energía; el lector habrá oído hablar de energías térmica, nuclear, de radiación y otras más. La energía solar, una energía de radiación, proviene de procesos nucleares (de fusión) que se dan en nuestra estrella. La radiación electromagnética se interpretaba antes como *energía calórica*, y la energía térmica, también asociada al calor, en realidad es *energía de movimiento*. Baste por ahora con observar que a menudo no se sabe a qué se están refiriendo cuando nos hablan de energía. Usted puede corroborar cómo cualquier lego en la materia usa y abusa del término, en ocasiones para engañar incautos. Por último, en los procesos cuánticos puede observarse más fácilmente la validez del denominado *principio de conservación de la energía*.

Las dos cantidades físicas, propiedades físicas de un cuerpo con inercia *m* (recuerde que en física básica la masa *m* es la medida de la inercia de un objeto), cantidades que varían al prolongar, respectivamente, la *acción de una fuerza* en el tiempo y en el espacio, a saber, el momentum y la energía, sobreviven más allá del campo clásico, se asignan como propiedades de entes o sistemas cuánticos para los que el término 'fuerza' puede haber perdido significado: las dos son *observables cuánticos*. Veremos que el hecho de 'observarlas', determinarlas, generalmente altera lo que se denomina *el estado del sistema*, estado del cuerpo de masa *m* para el caso. Nótese que la observación, casi siempre una interacción, resulta en una perturbación, no siempre reducible a 'fuerza'; con mayor razón puede anticiparse esta conclusión en los experimentos ya citados, *medidas libres de interacción*. Es entonces de subrayar, en síntesis, que el concepto clásico de fuerza es *suplantado* en la nueva teoría por el de interacción. Este cambio de terminología es conveniente, porque permite una mayor precisión en el lenguaje.

Repitámoslo, a modo de síntesis: hay solo 4 interacciones conocidas, a saber, la gravitacional, la electromagnética, la débil y la fuerte, en orden de intensidad creciente. Rigurosamente hablando, la segunda y la tercera se resumen en una sola, *la interacción electro-débil*. Generalizar el concepto de interacción es lo que se hace en la *teoría cuántica de campo*, sobre lo cual se dirá algo en los capítulos finales. Unificar las interacciones es una centenaria tarea iniciada por Borgevsky, continuada por Maxwell, intentada por Einstein y parcialmente realizada por Salam, Weinberg y Glashow más recientemente (también por Higgs). Los experimentos en el CERN que parecen confirmar la existencia de nuevos bosones apuntan en esa dirección.

Pero volvamos a la velocidad, o mejor a la cantidad de movimiento, para concluir lo que iniciamos varios párrafos atrás. Es *natural* pensar que deben efectuarse dos medidas consecutivas de la posición, en general de cada una de sus tres componentes, para poder precisar el valor de ***v*** y por ende de ***p***. Piénsese en el caso más sencillo de movimiento de un cuerpo (*masa puntual*) en una sola dirección, en línea recta, a lo largo de la recta que se suele designar por el eje X, para ser más

exactos. La posición será entonces *x*, la rapidez simplemente *v* (podríamos escribirla V_x si quisiéramos precisarlo mejor) y la correspondiente cantidad de movimiento o momentum, *p*. Las dos variables, *x* y *p*, son variables conjugadas. En mecánica clásica, esto quiere decir que la una se obtiene a partir de la otra mediante una operación matemática, una vez se conoce «la ley» o ecuación de movimiento. En la dinámica newtoniana y para el caso unidimensional, esa ley es $F = ma$ (o $F = dp/dt$), un enunciado preciso de la segunda ley de Newton en el caso más sencillo. La ley o ecuación de movimiento (dinámica clásica) permite encontrar la posición en función del tiempo, es decir, predecir la trayectoria del cuerpo de masa *m*.

En mecánica (dinámica) cuántica, si dos variables son o están *canónicamente* conjugadas, ello implica que la medida de la una afectará a la otra y viceversa. En un lenguaje más abstracto, sobre el que volveremos al final, dos variables conjugadas no conmutan (medir o determinar una de ellas y después la otra es sensible al orden en que se haga) y la diferencia de sus productos (productos de sus respectivos *operadores*, para ser más exactos), salvo porque es un número imaginario, es proporcional a la constante de Planck. Tal es el caso de la posición y el momentum: $xp_x - p_xx = i\hbar$. (La unidad de raíz imaginaria *i*, o $(-1)^{1/2}$, multiplicada por h-barra.) Aunque no lo podamos demostrar aquí, este resultado es importante porque ilustra la generalización del famoso principio de Heisenberg, al que nos referiremos enseguida.

Determinar en dos instantes sucesivos la posición para poder así determinar la velocidad (o lo que es igual, el momentum) es, en esencia, tomar dos *instantáneas* sucesivas de la posición, entre más vecinas en el tiempo mejor. La diferencia entre las dos posiciones, Δs, y la *incerteza* con que experimentalmente hemos determinado la cantidad de movimiento estarán relacionadas. La relación de incertidumbre de Heisenberg para este caso suele escribirse:

$$\Delta p \Delta s \geq \hbar/2.$$

Es de subrayar que ésta no es una expresión matemática o estadística, sino una relación natural, con profundo contenido físico, como lo es el enunciado de la segunda ley de Newton. Un segmento recto en el caso más simple o curvo en el caso general, una sucesión de puntos que se usa clásicamente para referirse al desplazamiento en un tiempo infinitesimal (movimiento) de un ente matemático (abstracto) llamado *masa puntual*, es sólo una abstracción de la realidad. En física clásica preferimos referirnos al segmento como *parte de la trayectoria*. En la teoría cuántica no se puede hablar de trayectoria, puesto que no se puede conocer simultáneamente la posición y la velocidad. Después se llegará a la conclusión de que la velocidad y la posición, en sí mismas y como determinantes de la *trayectoria*, tampoco tienen significado. Se volverá a esta discusión más adelante.

Resulta así que la sola *cuantificación* no es suficiente. Determinar cuantitativamente una cierta cantidad física es solo el primer paso. En el caso más simple considerado por la teoría clásica, un *punto material aislado* (algo en verdad inexistente), una partícula u objeto *libre*, es de subrayar que la nueva teoría permite determinar, en principio con absoluta precisión, la posición de la partícula; pero esa determinación exacta de la posición impide saber qué velocidad lleva y, por lo tanto, no sabremos nada acerca de su cantidad de movimiento e ignoramos, por ende, a dónde irá en el instante siguiente: *p* es cualquiera de los infinitos valores posibles. No nos sirvió de

mucho conocer la posición en un cierto instante. En ese sentido, *la mecánica cuántica no es predictiva*.

Por el contrario, en un experimento separado se puede determinar con absoluta precisión el momentum y por tanto la velocidad de la partícula libre; y ésta, salvo por el límite impuesto por la teoría de relatividad, podría tomar cualquier valor; pero surge un gran problema cuando se intenta precisar dónde se encuentra el *punto material* al que se le asigna el momentum *p* que se acaba de determinar, es decir identificar el valor que toma la variable conjugada a la cantidad de movimiento, la posición: también en principio, de acuerdo con la teoría cuántica, estará en cualquier lugar del universo; ya no se podrá decir dónde porque el principio de indeterminación lo prohíbe. Esa sería razón más que suficiente para afirmar, al contrario de lo que ocurre en el esquema newtoniano, que ese sistema tan simple, un objeto material aislado, *no existe* más que en la imaginación: nadie habrá visto ni verá jamás un objeto (cuántico) que viaje indefinidamente con velocidad constante, puesto que cada vez que lo observa, lo perturba y altera su velocidad. ¡Con mayor razón puede afirmarse que nunca lo verá en reposo! (Pero sí puede predecir cómo evolucionará el sistema, como veremos en los siguientes capítulos.)

Como en el caso anterior, en algunas ocasiones, más que a predecir, la teoría cuántica se limita a imponer unas restricciones; a advertirnos que, por ejemplo, si un fotón de frecuencia ν viaja a velocidad *c*, la velocidad de la luz, en una dirección determinada, por lo que conocemos con absoluta precisión su cantidad de movimiento, nunca podremos decir dónde se ubica ese fotón, excepto precisamente cuando termina su recorrido porque fue absorbido por algún sistema físico; supongamos, para ilustrar, que fue absorbido por un electrón que *se encontraba* en algún nivel permitido dentro del átomo (se suele decir que el electrón estaba ocupando un cierto *estado*): entonces el electrón cambia de nivel, de estado, e incrementa su valor de energía precisamente en la misma cantidad $h\nu$, la que antes tenía el fotón. Corolario: si un fotón viaja exactamente a la velocidad *c* (está condenado a no moverse a mayor o a menor velocidad), es porque se está asumiendo que es una partícula libre, lo cual es cierto mientras no tenga que manifestarse de alguna manera; y cuánticamente se tiene que renunciar a ubicarlo, excepto en el caso del *colapso*, cuando por algún proceso físico se logra saber dónde está, cuando justo es aniquilado. ¡Una especie de tragedia!

A propósito de restricciones, se suele hablar en física de objetos confinados. El más recurrente, por lo sencillo desde el punto de vista conceptual (parecido a, pero bien distinto de, el sistema Luna-Tierra), es el electrón en el estado de energía más bajo, estado base, del átomo de hidrógeno. Uno puede concluir que la magnitud de la cantidad de movimiento del electrón le permite estar en una región del tamaño del radio de Bohr, lo que será consistente con el principio de indeterminación de Heisenberg.

Los modelos sencillos, *toy models*, que se elaboraron desde que se formularon los principios básicos, han servido precisamente para poner cotas a los resultados de observaciones. Así se continúa trabajando en física cuántica un siglo después. Podría afirmarse que ese procedimiento hace parte del método científico en las ciencias naturales y seguramente también en las ciencias humanas y sociales. Tal vez sea ese, el modelamiento y la simulación, el punto de encuentro de

los dos campos de la ciencia, naturales y sociales, físicas y humanas, *duras y blandas*, o como quiera que gusten denominarlas: el que permite reconocer que en la práctica lo que hacemos es crearnos una imagen de la realidad, sin que esa imagen llegue a ser completa. Quizá el reconocimiento de las limitaciones o restricciones, algunas de ellas impuestas por la naturaleza misma, como es el caso del principio de indeterminación, nos permita un mayor acercamiento y diálogo interdisciplinario en el futuro.

2.2 Escalas de espacio y tiempo y sistema decimal

Lo primero que se debe tener en cuenta para hacer una descripción física apropiada de los fenómenos o rango de fenómenos son las escalas de espacio y de tiempo. En relatividad, aún dentro de los límites de la *relatividad especial*, esto no es sencillo. En general, nos limitaremos a los conceptos clásicos, newtonianos, de espacio y de tiempo. Los órdenes de magnitud involucrados entre lo más grande y lo más chico son tantos, que es conveniente recurrir a la notación científica y utilizar para ello potencias de diez; si positiva, la potencia indica el número de ceros a la derecha después de la unidad; si negativa, réstesele uno para obtener el número de ceros antes de la unidad a la izquierda después del punto o coma decimal. Así, por ejemplo, $10^2 = 100$ (una centena) mientras que $10^{-2} = 0.01$ (una centésima). Se aconseja al lector no familiarizado con el sistema decimal consultar una de las muchas tablas de múltiplos y submúltiplos de las unidades de medida fundamentales, en el sistema internacional de unidades (SI), metro, kilogramo, segundo, amperio, kelvin, para mencionar únicamente las que nos interesan.

El tiempo más grande del que se tiene noticia es la edad del universo, 10^{10} años en números redondos, en segundos, $4X10^{17}s$, para *lucir* más exactos y utilizar unidades de comparación más convenientes; lo mismo puede decirse de su tamaño, en la escala espacial: 10^{10} años luz, si se escoge por conveniencia como unidad de longitud la distancia que recorre la luz en un año. En el sistema métrico, la velocidad de la luz es de $3X10^8\ m{\cdot}s^{-1}$ (metros sobre segundo), por lo que puede estimarse el *radio* del universo actual en unos $10^{26}\ m$. Es preferible hablar de diámetro, ya que no hay punto alguno que pueda considerarse como centro del universo. Una galaxia se aleja de otra a una velocidad proporcional a la distancia que las separa: es la ley de Hubble. Las que para nosotros están *en el confín del Universo* se alejan de la Vía Láctea a una velocidad cercana a la de la luz con respecto a la nuestra. Nuestra estrella, el Sol, es apenas una entre los cientos de miles de millones de estrellas que pueblan *nuestra* galaxia, Vía Láctea. Con todo y su insignificancia en el conjunto universal, nuestro sistema solar se extiende aproximadamente hasta unos $10^{12}\ m$, no mucho comparado con la frontera del universo.

Sobra advertir que se ha escogido el metro como unidad de longitud en la llamada escala *macro* para comparar con nuestro tamaño. El ser humano alcanza a percibir con sus sentidos, particularmente con el de la vista, desde poco menos de un milímetro hasta unos pocos kilómetros. Si vemos con nuestros ojos objetos luminosos a distancias mayores (satélites, planetas, estrellas, incluso galaxias), no podríamos precisar a simple vista dónde (a qué distancia) se encuentran, mucho menos visualizar su interior: son como puntos difusos. La unidad usual de tiempo, el segundo, está en el rango del tiempo de duración de nuestras pulsaciones, por lo que es nuestra unidad *natural*. Nuestra vista alcanza a diferenciar dos sucesos separados

temporalmente por algo así como una décima de segundo. Obviamente ubicamos en nuestra memoria acontecimientos separados por algunos años, eventualmente varias decenas, nuestro rango de vida.

Los sistemas físicos más chicos son las partículas elementales, entre las cuales los leptones, por ser más livianos, se supone que son las más diminutas; el más común, el electrón, tendría un radio inferior a 10^{-18} *m*. Algunos cálculos estiman 10^{-25} *m*. Los diámetros del protón y del neutrón determinan el de los núcleos, en el rango de los femtómetros o fermis ($1\ fm = 10^{-15}\ m$). Los tiempos característicos de procesos elementales serían los más cortos que cabe imaginar: alrededor de 10^{-20} *s* (segundos), aunque algunos pueden ser 10 o más órdenes de magnitud más rápidos, no lo sabemos. Algunos procesos químicos ocurren en el rango de los femtosegundos ($1\ fs = 10^{-15}\ s$) y hoy es posible rastrearlos con precisión gracias a las espectroscopías láser: estamos en la era de la femtoquímica. Compárese ese valor con el de la escala temporal de Planck, 10^{-43} *s*. (Véase la nota de pié de página en página xx.) Recuérdese que, en el rango de fenómenos atómicos, el Ångström ($1\ Å = 10^{-10}\ m$) es la unidad apropiada; lo mismo puede decirse para expresar las distancias entre un átomo y otro en los enrejados cristalinos. Para la física y la química de cientos o miles de átomos, la físico-química de la materia condensada, el nanómetro ($1\ nm = 10^{-9}\ m$) es la unidad preferida. Hasta ahora se empieza a tomar conciencia de la importancia de los fenómenos nanoescalares para las aplicaciones tecnológicas del futuro (*nanotecnociencia*).

No sobra advertir al lector que utilizar en el lenguaje cuántico el término *partícula* es una imprecisión. Hemos dicho que un *ente cuántico* se manifiesta como partícula en ocasiones; en otras, se manifestará *como onda*. Pero no puede decirse que los entes cuánticos sean lo uno o lo otro. Por eso Feynman y otros expertos sugieren *ondícula* para ser *precisos*.

Se supone que la velocidad de la luz es la más alta permitida por la física; en el vacío, su valor es una constante fundamental; se suele redondear, como ya se ha dicho, a $3X10^{8}\ m/s$. Se ha hecho referencia obligada a otra constante fundamental: la constante de Planck, *h*. Su valor se da en unidades que, a diferencia de la velocidad, envuelven conceptos más abstractos: unidades de *acción*. Si el lector está familiarizado con las unidades de energía, *julios* o *ergios*, entre otras, le será fácil reconocer las unidades en que se expresa la acción, aunque su significado por ahora permanezca oscuro: energía por tiempo. El valor de *h* en el llamado sistema métrico o sistema MKSA (metro-kilogramo-segundo-amperio) es un número extremadamente pequeño (ya se hizo notar en un pié de página del capítulo precedente): $h = 6.6X10^{-34}\ J{\cdot}s$. Quizá no sobre recordar que los *julios* son $N{\cdot}m$, en donde *N* denota *newtons*, unidad de fuerza en el sistema que se adoptará a lo largo de estas notas. Por completez, recuérdese que la fuerza tiene unidades de masa por aceleración: $kg{\cdot}m{\cdot}s^{-2}$. Veremos que el momentum angular o *momento cinético* (vuélvase al final de la sección 1.2) también tiene unidades de acción; mas *no es acción*; son conceptos diferentes, equiparables si se quiere a impulso y momentum.

Para finalizar esta sección, recordemos que a nivel cósmico se habla de unidades astronómicas, de años luz, de parsecs y cosas por el estilo. El radio del Universo es de unos diez mil millones de años luz. ($13.7x10^{9}$.) Para expresar la velocidad a que se aleja una galaxia se hace referencia a la

fracción de la velocidad de la luz que tiene esa galaxia con respecto a la nuestra: *0.5c*, por ejemplo.

Sirva esta rápida mirada a las diversas escalas de longitud y tiempo para una reflexión final, antes de continuar con los conceptos que caracterizan los períodos clásico y cuántico de la física; asumamos, por comodidad, que la relatividad es el punto culminante de la física clásica y el derrumbe del mecanicismo; de allí surgió la elegante teoría de campos, *campos de fuerza*; las dos teorías que surgieron después, teoría de relatividad y física cuántica, se combinaron en la teoría cuántica relativista de campos: ella es la herramienta físico-matemática más poderosa de que se dispone hoy en día. ¿Será posible describir tan variada gama de fenómenos, en rangos tan amplios de espacio-tiempo, con una sola teoría? Ese ha sido un reto insuperable, por ahora. Se dice que ello hubiera sido posible cuando las interacciones estaban unificadas, en la llamada *era de Planck*.

2.3 Alcances y limitaciones de los modelos

Por comodidad, limitemos el mundo macroscópico *clásico* al rango de fenómenos que podemos visualizar sin instrumentos. Descartemos así el mundo accesible mediante microscopios de cualquier tipo y la mayor parte de los eventos astronómicos, al menos los que no se dejan ver sin telescopios poderosos.

Las leyes de la naturaleza que rigen los fenómenos descubiertos u observados antes de 1900, en especial de los que para entonces se reconocían como fenómenos físicos, caen como ya se mencionó dentro de la usualmente denominada física clásica; esto quiere decir que solamente se habían tratado dentro de la física aquellos aspectos de la naturaleza para los que la cuestión de cuál es la constitución última de la materia no es algo a lo que se pudiera dar, desde el punto de vista científico, una respuesta siquiera aproximada, tal como se concibe la ciencia de hoy; mucho menos cabrían, desde ese punto de vista, preguntas científicas sobre su origen y su destino. De todas maneras, las leyes que empezaron a explicar científicamente su comportamiento resultaron ser casi siempre contraintuitivas; *contraintuitivo* es, sin duda alguna, para ilustrarlo con un ejemplo cotidiano, *el principio de inercia*. Las leyes del electromagnetismo son todavía más abstractas, puesto que envuelven el concepto de campo, el mismo que condujo directamente a ondas electromagnéticas: la primera gran unificación que se dio en la física.

Cuando se aplican las leyes de la física clásica a los sistemas macroscópicos, se pueden describir solamente ciertos rasgos globales del comportamiento del sistema. Los detalles más finos, como acabamos de ver, se ignoran o simplemente se dejan de lado. Esos detalles finos, o mejor, imperceptibles a los sentidos sin la ayuda de instrumentos y teorías con alto grado de sofisticación, emergen y dan lugar a un rango de fenómenos en mayor grado contraintuitivos que los considerados clásicamente. En este sentido, es de esperar que las leyes de la física clásica sean leyes aproximadas de la naturaleza; por tanto, deben considerarse como el límite de otras leyes más fundamentales, de alguna manera microscópicas en el caso del micromundo, *submicroscópicas* por debajo, en el *nanomundo* y el mundo de las partículas elementales, o *cosmológicas* en el caso del macrocosmos (el nuestro sería el *mesocosmos* en esa escala). Es de suponer que éstas nos darán una mejor información en las respectivas escalas. Dicho en otras palabras, las teorías clásicas son teorías descriptivas o fenomenológicas. Una teoría fenomenológica intenta describir, concatenar y resumir hechos experimentales dentro de un cierto dominio limitado del campo en una disciplina científica. Al dividir por comodidad en rangos y dominios los fenómenos naturales, se renuncia a la posibilidad de abarcarlo todo; sin embargo,

una buena teoría fenomenológica debe describir de manera más o menos precisa cualquier fenómeno enmarcado dentro de aquel dominio limitado.

En realidad toda teoría física actual es de alguna manera fenomenológica en dos sentidos: 1) trata de los fenómenos, eventos o hechos que ocurren físicamente dentro de un cierto rango; 2) no se ha construido *la teoría de todo*. Siempre, hasta el presente, hemos tenido que dejar algo de lado, por simplicidad o por la imposibilidad física de considerar todos los aspectos simultáneamente. La gravitación cuántica, por ejemplo, está en pañales. Por ahora miro con escepticismo las teorías que pretenden incluirlo todo, la conciencia por ejemplo, en la descripción del mundo físico como un sistema completo, aceptando que la conciencia no es algo que provenga de interacciones extrañas al mundo físico como tampoco lo es todo tipo de información.

Las teorías clásicas no poseen validez universal, por muy buenas teorías fenomenológicas que sean; no lo dicen todo, ni siquiera acerca de los sistemas macro- o mesoscópicos que describen. A modo de ejemplo, no se puede explicar mediante una teoría fenomenológica por qué los puntos de fusión o de ebullición de una determinada sustancia ocurren a la temperatura a la cual se observa que el fenómeno se presenta; por qué las densidades de masa, las resistividades eléctricas, las conductividades térmicas, las constantes elásticas de los materiales tienen los valores que tienen. La dilatación de un sólido debida al calor, la tensión superficial en un líquido, la emisión de luz de un cierto color en un gas enrarecido o en un sólido bajo ciertas circunstancias son fenómenos que simplemente se describen, sin explicarlos. El color cobrizo, dorado o plateado de los tres metales nobles, Cu, Au y Ag, respectivamente, el brillo característico de ciertas estrellas, el tipo de magnetismo que exhiben ciertos materiales sólidos, el comportamiento ferroeléctrico de otros son propiedades que una teoría fenomenológica no puede aspirar más que a describir hasta cierto punto. La atracción entre los cuerpos debido a su masa, su repulsión electrostática cuando están cargados, etcétera, pueden formularse por medio de leyes que creemos muy precisas, pero el origen mismo del fenómeno se ignora por completo en la teoría clásica. Por qué el azufre no conduce la electricidad, por qué el núcleo de uranio se desintegra espontáneamente, por qué el mercurio se vuelve superconductor por debajo de cierta temperatura (4.2 K exactamente), son preguntas sin respuesta en la teoría clásica macroscópica. De hecho, las actuales teorías microscópicas de la superconductividad, no pueden dar aún una respuesta satisfactoria a la última inquietud (el valor de la llamada *temperatura crítica*, por debajo de la cual el material exhibe ese fenómeno). Se podría seguir con muchos ejemplos de la vida cotidiana en los cuales la física clásica tiene poco o nada que decirnos.

Pero las 2 grandes teorías del presente, la teoría general de gravitación y la teoría cuántica, tampoco logran explicarnos la mayor parte de lo que observamos. Hoy se sabe que el Universo se está expandiendo más vertiginosamente de lo que se sospechaba; todavía se ignora el por qué. Lo mismo ocurre en otros campos de la ciencia. Se ha descubierto que lo que denominaban ADN basura tiene mucha más información de la contenida en la doble cadena. Las glías no son simples conectores entre neuronas.

Todo el mundo *civilizado*, durante el siglo XX y lo que va corrido del XXI, ha utilizado tecnologías basadas en el transistor, el diodo emisor de luz, el láser y gran número de espectroscopías cuyos fundamentos probablemente no entiende, todos ellos fundamentados en la denominada física moderna. Pero ésta no puede suministrarnos por ahora mucho de lo que quisiéramos saber. Las aplicaciones de la segunda revolución cuántica exigen refinamientos mayores. La actual teoría de partículas elementales, con todo y ser una teoría cuántica relativista, es una teoría fenomenológica *moderna*.

A propósito de esa arbitraria denominación, debería tenerse en cuenta que *lo moderno* es lo de moda. Históricamente se han introducido periodos postmodernos o contemporáneos y habrá que referirse, de seguir así, a estilos o formas de pensar post-postmodernos o post-postcontemporáneos. Suele considerarse a la física aristotélica una descripción no científica, porque carece del método llamado científico introducido por Roger Bacon y Galileo Galilei. A partir del método matemático-experimental iniciado por los clásicos, Galileo, Newton, Faraday, Maxwell... se lograron avances tan formidables que llevaron a pensar, a fines del siglo XIX, que las leyes fundamentales habían sido descubiertas: fue el triunfo de la ciencia moderna representada en la física clásica, un triunfo efímero como todos, puesto en evidencia por lo que actualmente se denomina moderno en física. El *modelo estándar* atómico de mediados del siglo XIX ha sido reemplazado por el *modelo estándar* de partículas de fines del siglo XX. Es posible que ese modelo estándar cambie nuevamente en esta primera parte del XXI. (Recuérdese lo que se espera del LHC e imagínese lo que ocurrirá en la física *si la partícula divina* no es una sino varias.)

Hay preguntas más fundamentales que surgieron en el pasado remoto pero que sólo recibieron algún tipo de respuesta durante el último siglo. La respuesta en muchos casos no es todavía definitiva: no se dispone de una teoría completa para ello. Hay, como ya lo hemos señalado, dos teorías físicas muy avanzadas... no se sabe aún qué tan *completas* puedan ser, pero se puede anticipar que cada una por sí sola no logrará una descripción completa de todo. Una es la relatividad general, la otra es la física cuántica, en su forma más avanzada, la teoría cuántica relativista. La primera no es de interés para los fenómenos que se van a describir aquí. De la segunda, solo nos interesan en este ensayo preliminar los rudimentos, generalmente en el *límite de bajas velocidades*. Pero para ello es mejor empezar por discutir algunos conceptos clásicos en ese límite. Veamos.

2.4 Sistemas físicos y formalismos

En física clásica, el sistema físico es una idealización de la realidad. Cuando se habla del movimiento de la Luna, se suele decir que es como un punto matemático que se mueve en una trayectoria circular, manteniéndose a una distancia de 384,403 kilómetros de la Tierra. Puede agregarse que su diámetro es 3,476 kilómetros; que su movimiento es sincrónico: tanto la rotación de la Luna como su órbita alrededor de la Tierra duran 27 días, 7 horas y 43 minutos; y que esa rotación síncrona se debe a la distribución asimétrica de su masa. La primera frase es una verdadera abstracción del sistema físico real; en la segunda, se suministra información suficiente para cuestionarme sobre la validez de esa abstracción. Antes de terminar este párrafo, quiero dejarle al lector no científico una inquietud: ¿será que la Luna *va a continuar* moviéndose de esa manera? ¿No se estará *extrapolando* demasiado?

El movimiento de la Luna (y de los planetas) sólo pudo ser entendido de manera global cuando Newton incorporó, adicionalmente a sus leyes de movimiento, una ley de fuerza, la llamada ley del inverso del cuadrado de la distancia. Sobre esa ley hablaremos en la siguiente sección.

Una vez que se ha observado que el movimiento de la Luna es circular, pueden utilizarse las otras leyes para concluir, a partir del resultado, que la Luna se mantiene en su órbita con el periodo de 27.3 días aproximadamente, gracias a que la Tierra la atrae con una fuerza proporcional al cuadrado de la distancia, una nueva ley. Eso fue lo que hizo Newton, echando mano de las leyes del movimiento planetario de Johannes Kepler, deducidas a partir de cuidadosas observaciones

del movimiento de los cuerpos celestes. La primera se refiere a la forma de las órbitas: son elípticas; recuérdese que el círculo es una forma particular de elipse. La segunda sostiene que las áreas barridas por el 'radio' de la órbita (*r*, un radio variable para el caso general; o **r**, un vector de posición cuya variación describe la trayectoria) son tales que áreas barridas en tiempos iguales son iguales. Más sencillo: la tasa de cambio del área que barre la distancia del cuerpo celeste al Sol es constante. Esa afirmación parece obvia en el caso del movimiento circular: la podemos utilizar para deducir cuál es la rapidez o velocidad promedio en el movimiento circular uniforme de la Luna alrededor de la Tierra, si usamos como datos el radio de la órbita lunar y su período. La tercera es más complicada, y fue el triunfo más grande de las observaciones de Kepler, a la vez sustentado en las de sus predecesores, Nicolás Copérnico y Tycho Brache: afirma que los cuadrados de los períodos son proporcionales al cubo de los semiejes mayores, en este caso el radio mismo: $T^2 \propto R^3$. A partir de la segunda ley de Newton sobre el movimiento, es fácil demostrar que la relación exacta es: $T^2 = 4\pi^2R^3/GM$, siendo M la masa de la Tierra en el caso del movimiento de la Luna, o del Sol para el caso de la Tierra o cualquiera de los planetas o cuerpos del sistema solar que giran en órbita elíptica alrededor del Sol.

Las tres leyes de Kepler sobre las órbitas traen pues implícitas la segunda de movimiento y la de gravitación universal. Aparentemente simple, la generalización del resultado exigió un nivel de abstracción como nunca antes había ocurrido en la historia de la ciencia y la introducción (el descubrimiento) del cálculo diferencial. Basta con echar una mirada a *Philosophiæ naturalis principia matemática*, la monumental obra de Newton impresa por primera vez en 1676 con su debido *imprimatur* o permiso eclesiástico; y a su historia.

Veamos ahora cómo usar lo anterior para deducir la ley de fuerzas mencionada en un caso muy particular, cuando la órbita es circular. Tal es el caso del movimiento de la Luna alrededor de la Tierra. Pero la ley es completamente general para los cuerpos celestes.

Si un cuerpo se mueve con velocidad constante, es decir, en línea recta recorriendo tramos iguales en tiempos iguales, es porque no hay fuerza neta actuando sobre él: es el enunciado de la primera ley de Newton, también conocida como ley de inercia, deducida empíricamente por Galileo cincuenta años antes en un proceso de abstracción nuevo para la ciencia. Por el contrario, un movimiento curvilíneo no puede ser *uniforme*, es decir, no puede ocurrir sin aceleración. Hay entonces dos componentes básicas de la aceleración: la tangencial, responsable del aumento de la rapidez, y la normal, que da cuenta del cambio en la dirección del movimiento. Se la denomina también aceleración radial, pues va en dirección contraria al *radio de curvatura*.

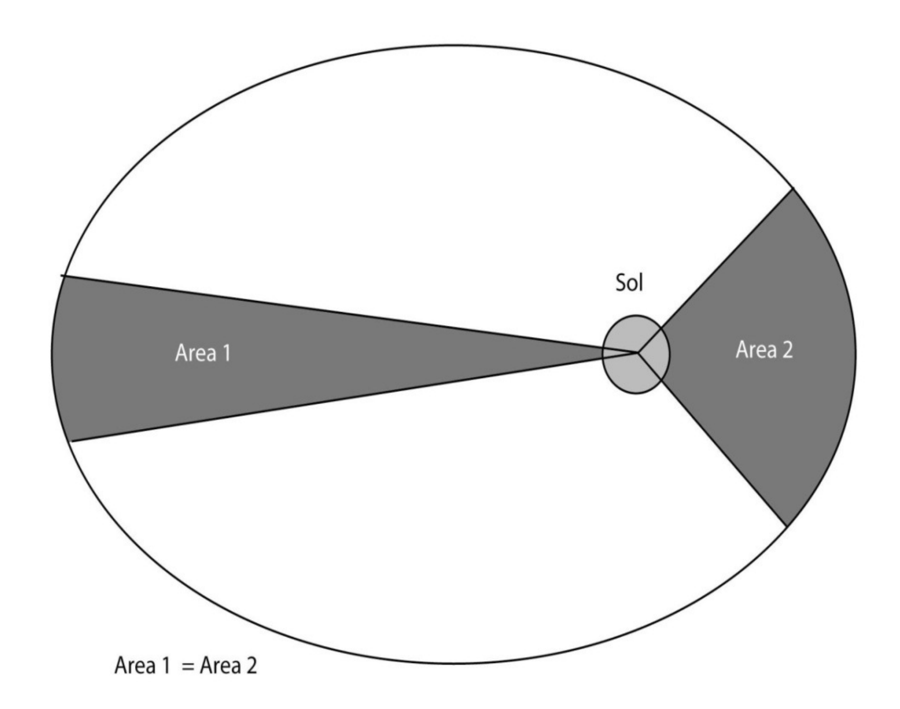


Figura 2.2 Leyes de Kepler. La primera se refiere a las trayectorias (elípticas) de los planetas y la segunda a las áreas barridas en tiempos iguales. La ley de los periodos es consecuencia de la variación de la intensidad de la fuerza atractiva, proporcional al inverso del cuadrado de la distancia.

Sin entrar en detalles, es fácil concluir que cuando un cuerpo se mueve en trayectoria circular ($r = R$) con rapidez constante, experimenta una aceleración radial o centrípeta (hacia el centro de la trayectoria) proporcional al cuadrado de la rapidez (magnitud de velocidad, v) e inversa a la curvatura, el radio en este caso: en símbolos, $a = v^2/R$. No es difícil ver, a partir de la definición de rapidez (distancia recorrida/tiempo empleado en recorrer esa distancia), que v está dada por $2\pi R/T$, denotando por T el periodo del movimiento circular, un movimiento periódico porque se repite cada T segundos. En consecuencia, $a = v^2/R = 4\pi^2R^2/T^2R \propto 1/R^2$. En el último paso, se ha hecho uso explícito de la tercera ley de Kepler. Más exactamente, $a = GM/R^2$, lo que es equivalente a afirmar que en magnitud ($F = ma$)

$$F = (GM/R^2)\ m,$$

enunciado de la ley de gravitación universal de Newton. Es evidente que en la superficie de la Tierra, $a = g$, una “constante” cuyo valor exacto depende de la posición, longitud, latitud y altura. Suele asignársele el valor de $9.8\ m\ s^{-2}$. Para simplificarles la vida, a mis estudiantes de *fundamentos de física teórica* suelo decirles que redondeen ese valor a $10\ m\ s^{-2}$.

Veamos el proceso inverso. Si se invoca de nuevo la segunda ley de Newton, $F = ma$, se concluye a partir de Kepler que sobre la Luna actúa una fuerza debida a la Tierra cuya magnitud se expresa de esta manera: $F_{TL} \propto M_L/R^2$. Recuerde el lector el enunciado simple de la tercera ley de Newton: si un cuerpo hace fuerza sobre otro, el segundo a su vez hará una fuerza sobre el primero, igual en magnitud y en dirección opuesta. En símbolos, para el sistema Tierra-Luna, la Luna hará una

fuerza dada en magnitud por $F_{LT} \propto M_T/R^2$. No exige mayor razonamiento concluir que tienen que estar envueltas, en la expresión definitiva, tanto la masa de la Luna como la de la Tierra: $F_{TL} = F_{LT} \propto M_T M_L/R^2$. Salvo por la constante de gravitación universal, $G = 6.6\times10^{-11}\ m^3/kg\ s^2$, ese fue el resultado arriba anunciado. Este valor es justo el necesario para que podamos movernos en la Tierra con la desenvoltura con la cual lo hacemos.

En la Luna, *g* resulta ser un orden de magnitud inferior. Exigirá un fuerte entrenamiento aprender a desenvolverse en esas nuevas condiciones, un entrenamiento que requieren los astronautas y al que se someten algunos excéntricos multimillonarios que piensan *viajar al espacio*. Sirva esta reflexión para llamar la atención sobre la responsabilidad que tenemos con nuestro planeta tierra: es difícil que encontremos mejores condiciones de vida en otro lugar del universo. Por el contrario, los organismos diminutos no dependen tanto del valor de la constante de gravitación para sobrevivir. Puede ser más bien el valor de la correspondiente constante en la ley de Coulomb (la encontraremos más adelante) el que da lugar a las fuerzas de cohesión que priman en esa escala.

Algunos de los lectores dirán: el movimiento de la Luna es demasiado complicado; les asiste la razón. ¿Por qué no partir del movimiento de una piedra? Veamos qué tan sencillo es este último: si la piedra cae, lo hace también por la atracción gravitacional de la Tierra. Obsérvese que cerca de la superficie de la Tierra hay también una gruesa capa de aire, no siempre en reposo, en ocasiones capaz de alterar drásticamente el movimiento de una piedra. Si se intentara poner en órbita la piedra, como puede hacerse con un satélite artificial, este efecto sería severo, con toda seguridad, aun a las distancias a que suelen colocarse los satélites artificiales. Perdería rápidamente su energía y terminaría por caer, como caería también el electrón hacia el protón, en el caso del átomo de hidrógeno, de ser válidas para ese caso las leyes de la electrodinámica; en este último caso la energía se disipa en forma de radiación. A propósito de objetos pequeños, la Universidad Sergio Arboleda consiguió que la NASA le colocara en órbita un pequeño **satélite colombiano** (*Libertad I*. Véase http://www.usergioarboleda.edu.co/proyecto_espacial/index.htm).



Figura 2.3 Comunicando suficiente impulso, (digamos por simplificar que recurriendo a un ser especial) podría aspirarse a poner un objeto material, por ejemplo una pelota de béisbol, en órbita. En la práctica, muy cerca de la superficie de la Tierra esto no funciona, porque hay un fuerte rozamiento con la atmósfera terrestre. Para la velocidad que habría que imprimirle, 8 km/s, o más dramático, 29,000 km/hora, la pelota no tardaría en arder en llamas. En la ionosfera el efecto es mucho menor. Por eso se elevan a unos 200 km sobre la superficie de la Tierra los satélites artificiales.

Haciendo caso omiso de la presencia del aire, un estudiante de secundaria pronto aprende a utilizar la ley de caída de una piedra en el vacío para saber a qué altura está un puente que salva un precipicio en un acantilado: cuenta el tiempo (t_1) que tarda en escuchar, a partir del momento en que la suelta, el eco del impacto de la piedra contra la superficie, roca pura, en el fondo del precipicio; si tiene en cuenta el tiempo que le toma a la onda sonora llegar hasta su oído desde el fondo ($t_2 = h/v_s$, si v_s es la velocidad del sonido), obtendrá el resultado utilizando la expresión $h = ½gt^2$. Expresar el resultado en términos del tiempo de caída: $t = t_1 - t_2$, le tomará unos pocos segundos. Considero innecesario mencionar al lector que g es el valor de la aceleración debida a la gravedad en el puente y sus alrededores; sin ser muy precisos, en un experimento para el cual no se dispone de sofisticadas técnicas de medición del tiempo y en donde hay otros parámetros fuera de control, el estudiante puede confiadamente redondear el *dato* anterior a $10\ m/s^2$. El

resultado será relativamente fiable, pero depende de otros factores que no se han tenido en cuenta: roce, viento, forma de la piedra, etc.

Se han hecho muchas aproximaciones; se supone que los resultados pueden mejorarse indefinidamente, como imaginaron los físicos hasta antes de 1900. Si la altura es muy grande, el efecto del roce con el aire, dependiente de la velocidad, hace muy imprecisa la medida. Tal vez los cráteres y las montañas que hoy tenemos más o menos bien detectadas en la Luna no importen mucho para su movimiento alrededor de la Tierra: ella arrastra una tenue capa de gases, su propia atmósfera, en su movimiento; esa capa forma parte del sistema bajo estudio, como ocurre con la atmósfera terrestre cuando nuestro planeta gira elípticamente alrededor del Sol. La mecánica newtoniana da por sentado que las simplificaciones hechas en los dos casos son válidas. Pero si la superficie de la piedra es muy rugosa, si hay poros que permiten el flujo de aire a través de la piedra, si no es grande comparada con... las suposiciones son muchas, seguramente mayores que en el caso de la Luna en su órbita circular, o de la Tierra en su trayectoria elíptica; bueno, todo depende... podríamos seguir añadiendo peros y enmendar posibles fallas del modelo; o por el contrario, usar balines de forma esférica, utilizar bombas de vacío, para simplificar o aproximarse a las condiciones ideales, etcétera, etcétera.

El movimiento de un objeto poroso en la atmósfera terrestre es en verdad lo bastante complejo como para que se pueda describir, sin más, por las leyes de Newton. ¡No funciona! Pertenece más bien a la dinámica de fluidos, un campo bastante complejo de la física aplicada y de la ingeniería. No es que las leyes de Newton hayan dejado de ser válidas, el problema es que no es posible tener en cuenta la influencia de cada una de las partículas que intervienen en el proceso. Pero puede ocurrir que el problema no sea solamente la atmósfera terrestre. Imaginemos un experimento en que, desde la parte superior de un tubo en el cual se ha hecho alto vacío, se suelta un objeto: es lo que dicen que imaginó Galileo, para concluir que una piedra, un corcho y una pluma caen con la misma aceleración, la de la gravedad, en una cámara vacía. Ahora suponga que ese objeto es diminuto: apenas una parte de otro objeto también comparativamente pequeño, el electrón, por ejemplo, de masa mil ochocientas veces menor que el núcleo del átomo de hidrógeno, un protón. ¿Qué habrá más sencillo, más elemental que ese sistema físico? Pero ya sabemos que las apariencias engañan: es inútil intentar describir la caída en el campo gravitacional de la Tierra de un electrón desprendido de un átomo o del ión remanente del átomo al que se le desprendió el electrón. La argumentación anterior lo llenará de razones. Por el contrario, el físico norteamericano Robert Andrews Millikan, a quien nos referiremos en varias ocasiones, determinó indirectamente la carga del electrón observando, *aumentando*, el efecto de la viscosidad y de campos eléctricos en pequeñas gotas de aceite ionizadas. Dos décadas atrás Joseph J. Thompson había encontrado la relación entre la carga y la masa del electrón utilizando una cámara de vacío relativamente modesto y olvidando por completo la atracción gravitacional. Mencionaremos estos experimentos famosos al final del capítulo. Vayamos ahora a un electrón *de verdad*, el que está ligado al átomo de hidrógeno.

El sistema físico ahora es cuántico. La solución que se obtiene con la propuesta de Bohr en el caso más sencillo, sin utilizar del todo mecánica cuántica, es *exacta*, dentro de los límites impuestos por la teoría no relativista. Cuando se describe un electrón de un átomo de hidrógeno en su

estado más bajo de energía, -13.5 eV,[15] en el esquema de Schrödinger, se renuncia a saber dónde está exactamente; pero es seguro que se le va a encontrar a una distancia de aproximadamente medio ångström (Å) del núcleo del átomo, al menos con un 80 % de exactitud... o de probabilidad: el error sería de *0.01 Å*. Se puede afirmar con certeza que el radio del átomo de hidrógeno es de *0.51 Å*. ¡No hay medida clásica que nos permita ser tan precisos! Nótese algo más: no hay para qué pensar en la viscosidad... es un *efecto ausente*. Para todos los propósitos imaginables, la región entre *el orbital* electrónico y el núcleo atómico está *vacía*. (Pero ¡cuidado!: el vacío está lleno de energía.)

En el ejemplo anterior se ha olvidado agregar que, en principio, se puede estar viendo la Luna sin afectar su movimiento; no podría decirse lo mismo del movimiento del electrón en lo que todavía se denomina, equívocamente, *órbita*. Con toda seguridad, si se tuviera con qué rastrear el movimiento del electrón, cualquier cosa podría ocurrir menos que siguiera *aferrado* de alguna manera a su *nivel de energía más bajo*. Para rastrearlo se requiere de una energía cercana a la que lo mantiene ligado muy cerca del protón. Podría ser la energía de un fotón que le permitiera pasar a su *primer nivel excitado*.

Si el lector ha oído hablar de la ley de Coulomb, una ley similar a la de Newton para la gravitación, estará advertido de que no podemos aplicarla de la misma manera que procedimos con la luna para saber dónde encontrar el electrón. La ley de fuerza, la de Coulomb, no se ha descartado del todo, pero hay una radical diferencia: el hecho de que la Luna se mueva en una trayectoria muy aproximadamente circular es algo puramente fortuito. Más fortuito lo es el hecho de que el radio de la trayectoria sea muy aproximadamente el dado arriba. Podrían ser 200,000 km o 500,000 km; o 500,001 km; o, por qué no, 500,000.005 km; o un número cualquiera, mucho menos interesante: todo depende del valor de su energía total, pero ese valor, de acuerdo con la física clásica, puede ser cualquiera. Para el electrón las cosas son diferentes: no podría estar, es prácticamente imposible, a *0.3 Å* o a 0.7 *Å* del núcleo: la probabilidad de encontrarlo a esa distancia del núcleo es en la práctica ninguna, tan pequeña es. Bohr fue el primero en proporcionar una pista sobre lo que ocurre en realidad. Volveremos a los *estados permitidos* del electrón en el átomo de hidrógeno más adelante.

Hay una situación en la cual se puede obligar al electrón a describir trayectorias circulares: poniéndolo bajo la acción de un campo magnético uniforme. Si se dispara el electrón perpendicularmente a la dirección del campo, experimenta una fuerza perpendicular a la dirección de la velocidad y del campo: eso es suficiente para que describa una trayectoria circular. La intensidad de la fuerza que experimenta es: $F = evB$, donde B es la intensidad del campo magnético. Con perdón del lector menos versado en matemáticas, voy a escribir una expresión más general que envuelve lo que se denomina *producto vectorial* entre la velocidad y el campo: ***F***

---

[15] eV: electrón-voltio. $1\ eV = 1.6x10^{-19}\ J$; el eV está definido operacionalmente como la energía que adquiere un electrón, una carga de $1.6x10^{-19}$ coulombios, al atravesar una diferencia de potencial de 1 voltio, es decir, al ser acelerado desde una placa cargada negativamente a otra cargada positivamente, entre las cuales se ha creado un campo eléctrico de $1\ N{\cdot}C^{-1}$ si estuvieran separadas por una distancia de un metro (algo insólito); se volverá a esta unidad de energía con frecuencia.

= -*e**v*×***B***. Para el caso, la *cruz* me dice que si el segundo vector (***B***) va en dirección *z* y el primero (***v***) está en el plano XY, digamos que en dirección *x*, el resultante o tercero, en este caso la dirección de la fuerza o la aceleración, va en dirección *y*. El signo menos en la expresión para la fuerza ha tenido en cuenta que la carga del electrón es *negativa* (un feo *atributo* para una partícula tan *fundamental* para nuestra vida, *error* involuntario debido a Michael Faraday). El efecto es hacer girar el electrón en órbita circular en el plano XY o en trayectoria helicoidal, como de vuelta de tornillo o de tirabuzón, si la velocidad inicial no está en el plano XY. Pero ese giro no está libre de pérdidas, en particular por la aceleración centrípeta (dirigida hacia el centro de la trayectoria y de magnitud v^2/R, siendo R el radio de la trayectoria).

Pero hay un problema cuando la magnitud de la velocidad del electrón que se mueve en un campo magnético es grande, es decir, cuando es una fracción importante de *c*, la velocidad de la luz: el electrón sigue las leyes del electromagnetismo de Maxwell y produce una radiación electromagnética por estar acelerado (sometido a una aceleración centrípeta), es decir, produce luz, *luz sincrotrónica*. Se denomina así, porque el aparato acelerador del electrón o de cualquier otra partícula cargada en un campo magnético alterna un campo eléctrico *sincrónicamente*. Cada medio ciclo, es decir, cada media vuelta el campo eléctrico tiene que invertirse, para cambiar la magnitud de la velocidad del electrón. Gracias a ese procedimiento, ésta puede llegar a ser una fracción importante de la velocidad de la luz y, en consecuencia, su masa ha crecido signficativamente. La luz resultante, emitida por el electrón, se conoce con el nombre de *radiación sincrotrónica*. Hay todavía otro problema, particularmente serio para pequeños radios: la *órbita* circular del electrón, así no se altere en cada ciclo su velocidad, no es cualquiera. Hay unos valores de energía o niveles electrónicos permitidos, conocidos con el nombre de *niveles de Landau*.

Se volverá al movimiento circular del electrón más adelante, cuando se hable de los experimentos que condujeron a su descubrimiento. El experimento de Thomson, un experimento decisivo, demostró que el electrón era una partícula; o mejor, arrojó claridad sobre dos cosas: a) los *rayos catódicos* que se producen en tubos de vacío bajo ciertas circunstancias, un haz coloreado, no son rayos: son corpúsculos; b) esos corpúsculos, extremadamente diminutos, tienen carga. Hasta entonces se supuso que la carga era un *fluido eléctrico*, un *continuum*.

Hablar de los efectos mencionados en el penúltimo párrafo está por fuera de las ambiciones de este ensayo. Para unas nociones preliminares, como las que aquí se pretende suministrar, se estima conveniente dejar de lado esas complicaciones. No obstante, vamos a mencionar un aspecto más que resulta de mucha importancia a la hora de discutir el comportamiento *como de onda* del electrón, inevitable por cierto.

Cuando se habla de un fotón, ente cuántico-relativista, se hace referencia a un sistema *sencillo* cuya posición no puede determinarse, pero cuya velocidad, no cabe duda, se conoce con precisión absoluta: es la máxima permitida y para el caso no puede ser menor: *c*. Cuando se describe un rayo de luz de determinada frecuencia, se puede dibujar algo parecido a lo que ilustra la figura 2.4: la representación matemática espacial de la intensidad (cuadrado de la amplitud para una función sinusoidal) de una onda *monocromática* (de un solo color, vale decir, de frecuencia muy

bien definida) que rigurosamente se extiende en las dos direcciones hasta el infinito y que viaja en una de las dos direcciones, positiva o negativa, con velocidad *c*. Si se conoce con precisión la frecuencia, como es el caso que ilustra la figura matemática adjunta, se sabrá que la energía del fotón es *exactamente hν*, pero eso no puede afirmarlo la teoría clásica. En otras palabras, clásicamente es imposible *preparar* una onda en rigor monocromática. Pero aunque parezca paradójico, en principio en un buen laboratorio se pueden obtener fotones con *cualquier* valor de energía, es decir, con la frecuencia deseada: basta con tener las herramientas adecuadas.

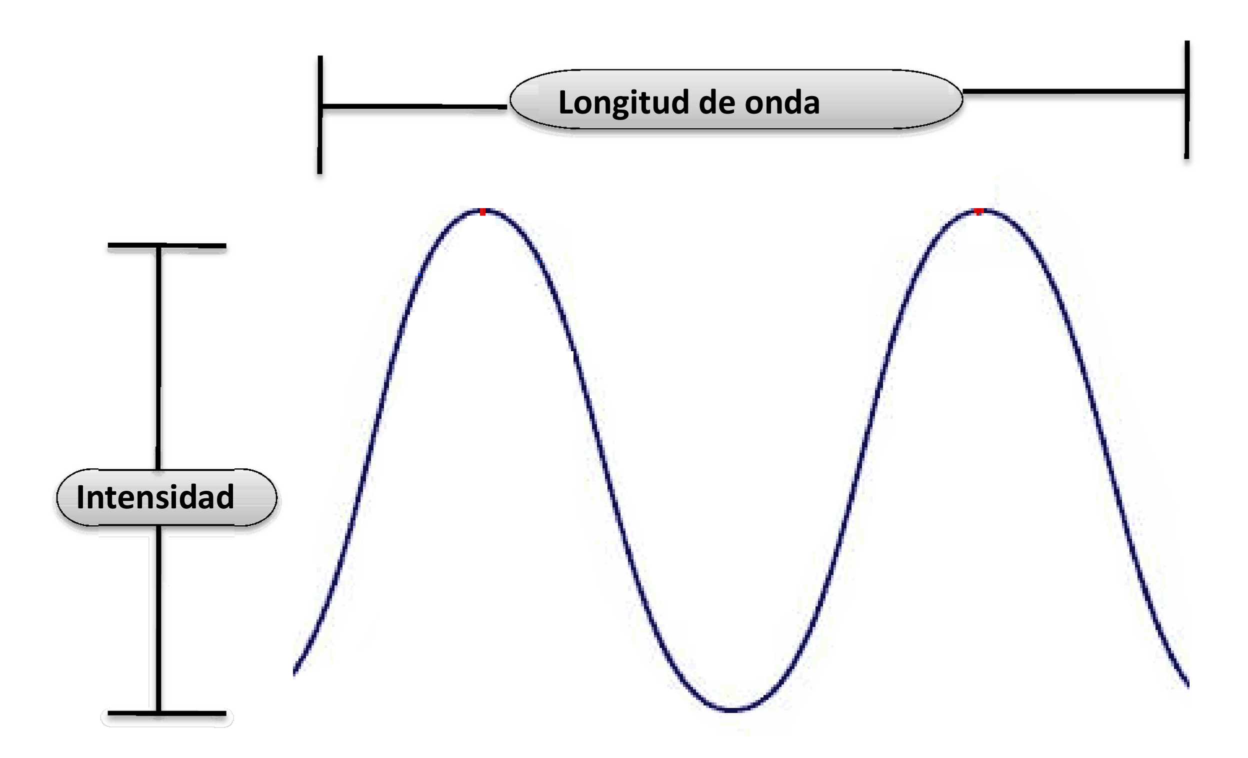
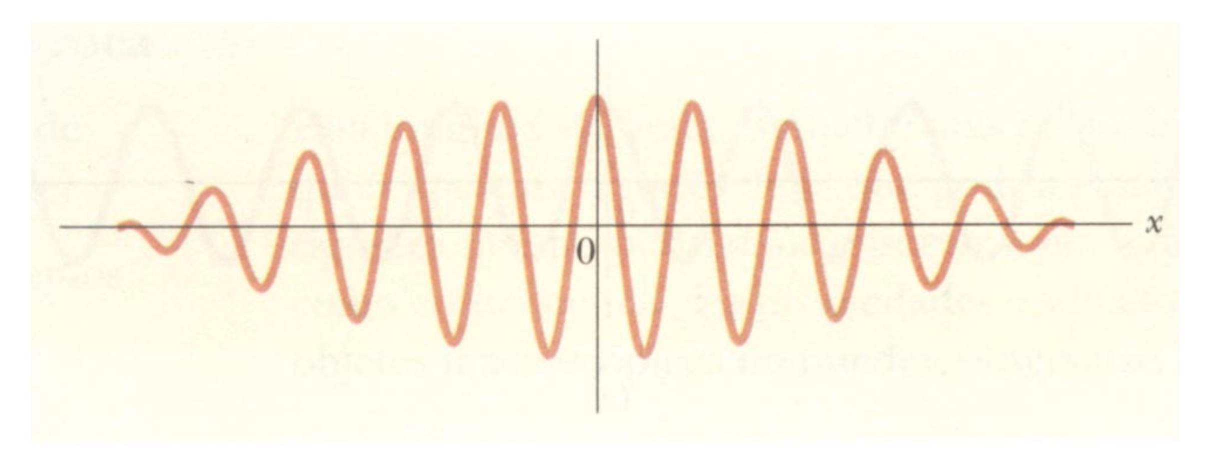


Figura 2.4. Ilustración espacial de la intensidad de una onda matemática en una dimensión. (La intensidad de la onda es proporcional al cuadrado de la amplitud, por ende siempre es una cantidad positiva. En cuanto a la amplitud, la gráfica sería el ciclo completo de una sinusoide.)

El sistema físico es una abstracción de la realidad; el formalismo es una descripción de esa realidad imaginada. Rodolfo Llinás, uno de nuestros máximos orgullos nacionales en ciencia, lo dice más tajantemente: *la realidad es la imagen que el cerebro construye del mundo exterior*. La imagen cuántica es la mejor que podemos imaginar, por ahora. ¿Qué nos dice la imagen clásica en los ejemplos anteriores? En el primero, nos permite hablar de órbitas o trayectorias circulares para la Luna, mas no para el electrón, al menos no con la precisión que clásicamente podemos *imaginar* para objetos macroscópicos; en el último, de ondas que se extienden indefinidamente, con una intensidad que, para el caso, es controlable; cuánticamente, la intensidad va a depender del número de fotones de la frecuencia o energía *seleccionada*.

En rigor, cuando queramos describir lo que ocurre con el electrón o el fotón, tendremos que emplear el formalismo cuántico y hacerlo recurriendo, por ejemplo, a una *función de onda* apropiada. Anticipemos desde ya que hay que renunciar a la posibilidad de interpretar esa onda en el sentido clásico. El formalismo clásico es a todas luces incompleto; el formalismo cuántico desagrada a muchos, a pesar de su exactitud. Hay más de una *imagen* (o lenguaje) para hacerlo, como veremos, todas equivalentes. Las de Heisenberg y de Schrödinger son las más usuales. Cualquiera de ellas difiere tanto del acercamiento tradicional de la física a la explicación de los fenómenos que hasta podría pensarse que la física tuvo que renunciar a *interpretar la realidad*, contentándose con describirla.

En la imagen de Schrödinger, si se tratara de utilizar una función de onda real que describiera a un electrón que viaja por el espacio, un esquema frecuente se ilustra en la figura 2.5. Para lograrlo, hay que apelar a una superposición de ondas de frecuencias en un cierto rango que dé como resultado un paquete de ondas como el mostrado en la figura 2.5a, por cierto incompleto. En el de la figura 2.5b, tomado de una página de la UAM Iztapalapa (México), la superposición es clara. Volveremos a la superposición de ondas en el capítulo cuarto.



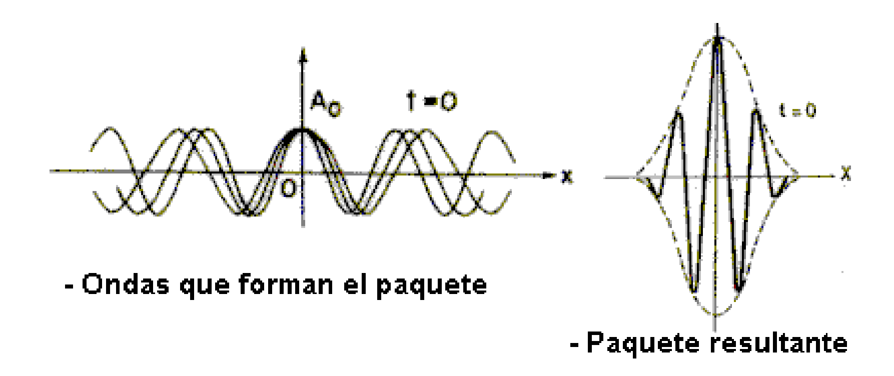


Figura 2.5. Paquete de ondas. a) Superposición de muchas ondas planas. b) Superposición de 3 ondas. (Esta última fue tomado de UAM (Universidad Autónoma de México), Iztapalapa: http://luz.izt.uam.mx/mediawiki/index.php/Paquete_de_Ondas)

Se ha querido advertir al lector, con los ejemplos mencionados, de que los *entes cuánticos*, el electrón y el fotón, rigurosamente no se comportan ni como partículas ni como ondas. Se quisiera suponer que él estará familiarizado con el comportamiento de unas y otras; en las secciones posteriores del presente capítulo se darán breves nociones sobre las segundas, de más difícil aprehensión; es importante apreciar la diferencia radical existente en los conceptos clásicos que se tienen de partícula y de onda. En el caso del electrón ligado al protón en uno de sus niveles energéticos permitidos, *órbitas cuánticas* si lo prefiere, existe cuánticamente una *función de onda* que nos permite predecir o afirmar con certeza el valor de la energía que tiene, sin que para la posición nos permita hacer más que afirmaciones *probabilísticas*: para el nivel más bajo, la *nube electrónica* está concentrada en un cascarón esférico muy delgado (centésimas de Å), similar a la de la figura 2.9. En el caso del fotón, ya se ha dicho que no puede asignársele una posición con mayor probabilidad que otra cuando se conoce exactamente su energía y su cantidad de movimiento. Es más, eso y su *estado de polarización* (un término ambiguo en física clásica, de gran importancia en la cuántica, al que volveremos más adelante) es lo único que podemos saber de él. Una función de onda compleja, lejanamente parecida a la representación clásica de la figura 2.4, esquematiza mejor la situación. De la teoría de relatividad, combinada con su descripción cuántica, concluimos que no existe algo así como un fotón en reposo, y que en condiciones *normales* se moverá siempre con la misma velocidad, *c* con respecto a cualquier observador en el Universo. Sobre el concepto de polarización, una clave importante en los experimentos que nos llevarán a redefinir el significado de *realidad*, *observación*, etcétera, se volverá en el capítulo cuarto, desde la perspectiva cuántica.

2.5 Variables cinemáticas y dinámicas

En la física clásica se suele hablar de variables; veremos que en la cuántica casi siempre nos referimos a «observables». La energía es el observable de mayor importancia en cualquier sistema físico. La *función de onda* en el esquema de Schrödinger (o el *vector de estado* en el equivalente matricial de Heisenberg y Dirac) es la *variable* más importante en física cuántica. Como ya se sugirió, se habla de la *evolución de la función de onda*, o en términos más modernos y abstractos, cambios del vector de estado. El no físico no tiene que preocuparse por el significado físico de ese ente matemático: es eso y nada más. Pero contiene toda la información que podemos aspirar a obtener respecto al sistema físico de interés. De lo demás, *no tiene sentido preguntárselo siquiera*. Los *observables* se obtienen *operando* sobre el vector de estado. Los siguientes capítulos no son más que un abrebocas al extraño comportamiento cuántico. En este haremos un esbozo de lo que ocurre clásicamente, lo que <u>observamos</u> en el mundo macroscópico que se comporta de acuerdo a la <u>lógica clásica</u> o esquema determinista y mecanicista, para comparar y contrastar.

El desarrollo de la física newtoniana dependió de la *invención* de una herramienta matemática denominada cálculo diferencial, herramienta que nos permite seguir, paso a paso, la evolución del sistema físico. La teoría cuántica prefiere recurrir a la palabra observable, precisamente porque la «evolución» es todavía más abstracta o compleja que una determinada «situación» o estado. Era necesaria otra herramienta para expresar matemáticamente el resultado de una medida: el formalismo de los vectores generalizados, útil para representar los estados cuánticos, y de

matrices, arreglos más sofisticados y poderosos que nos permiten determinar con precisión *estados propios* y *valores propios* de los *observables* asociados a un estado. Estos últimos son los valores permitidos, obtenidos en la medición de un observable, números reales en todo caso. Se regresa entonces al concepto de *variable*, pero desde la perspectiva de un *observable*.

La variación de la posición en el espacio nos describe una trayectoria, un concepto clásico que habrá que abandonar en el esquema cuántico. Podemos observar *mecánicamente* cómo cambia en el tiempo la posición y determinar la velocidad. Las tres componentes de velocidad, V_x, V_y y V_z, nos sirven para introducir un 'espacio de velocidades'. (Véase figura 2.8.) Ese es un *espacio vectorial*, como lo es el espacio cartesiano X, Y y Z, pero no hay que confundirlo con otros *espacios vectoriales* que se utilizan en la nueva teoría, los llamados *espacios de Hilbert*.

Volvamos a lo clásico. Si la rapidez o magnitud de esa velocidad, de ese vector, es pequeña y hay algún centro *atractor*, el sistema se mantendrá cerca del origen (o atractor) en ese nuevo espacio vectorial, denominado técnicamente "espacio recíproco". Ya se ha dicho que el momentum ***p*** es una variable más importante que la velocidad ***v***. Se suele hablar entonces del espacio recíproco como el espacio de los *momentos*, una traducción ilegal y ambigua del plural latino *momenta*, como lo es *cuantos* a cambio de *quanta*. (Por simplificar y para *jugar* con el término, se dejó la palabra *cuantos* en el título del ensayo que precedió a estas notas.) La variación de las tres cantidades, llámense componentes de velocidad o de cantidad de movimiento, se expresan mediante la ley dinámica bien conocida, escrita aquí en forma matemática precisa con el propósito de *retar* al lector no familiarizado con el lenguaje técnico, a apropiarse de él, sin complicaciones innecesarias pero con significados precisos: $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$, o más exactamente

$$\boldsymbol{F} = d\boldsymbol{p}/dt.$$

Esta es la generalización, para un objeto (un sistema sencillo, el de un solo cuerpo), de la segunda ley de Newton, válida aun en el caso en que la masa del objeto cambia (es lo que ocurre a muy altas velocidades). Si el lector recuerda que la aceleración promedio (en magnitud) se define simbólicamente como $\langle a \rangle = |\Delta \boldsymbol{v}|/\ \Delta t$, y que $p = mv$, no tendrá dificultad en aceptar la anterior generalización de la segunda ley de Newton, extendida a los casos en los cuales por alguna razón la masa del sistema físico cambia con el tiempo, por ejemplo un cohete que se impulsa expeliendo gases. De todos modos, aunque no lo vea muy claro, puede seguir adelante sin preocuparse. La generalización no la requerirá para entender los conceptos básicos de la nueva teoría, en donde ni siquiera esa generalización tiene sentido.

La *magia* de Newton, más allá de sus famosas tres leyes del movimiento, estuvo en aventurarse a encontrar «leyes de fuerza». La más famosa es la Ley de Gravitación Universal, escrita aquí una vez más, ahora en forma matemática precisa:

$$\boldsymbol{F} = -GMm\boldsymbol{r}/r^3.$$

Esta es una ley de fuerza central, atractiva (en la dirección $-\boldsymbol{r}$), cuadrática: la intensidad de la fuerza varía con el inverso del cuadrado de la distancia, y va en la dirección opuesta (atractiva) a la que une los centros de los cuerpos que interactúan o se atraen gravitacionalmente: M, la masa mayor de, por ejemplo, la Tierra, y m la pequeña masa, por ejemplo la Luna o cualquier satélite

artificial. $\boldsymbol{r}/r$ corresponde a lo que suele denominarse un vector unitario: no tiene dimensiones, pero siempre tiene la unidad de magnitud; por eso $\mathbf{r}/r^3$ tiene dimensiones de $1/r^2$, resultado al que ya se había hecho referencia. En coordenadas cartesianas se suele escribir $\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{j}$ y $\boldsymbol{k}$ para los tres vectores unitarios en direcciones X, Y y Z, respectivamente, de tal suerte que si se toma como referencia el origen, donde se encuentra en el caso mencionado la Tierra, se tendrá:

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k}.$$

Si se quisiera representar la posición y el movimiento de la Luna o de un satélite artificial que gira alrededor del centro de la Tierra en trayectoria circular, el esquema sería el representado en la figura 2.7.

Otra ley de fuerza de mucha utilidad es la llamada Ley de Coulomb, a la que se ha hecho referencia atrás. Es el punto de partida de los fenómenos electrostáticos. Basta cambiar la constante G gravitacional por una nueva constante k, eléctrica; y las expresiones o símbolos que se refieren a masa por otros que se refieren a la nueva propiedad física intrínseca de los cuerpos *cargados* eléctricamente. En rigor, a excepción de los 3 neutrinos, integrantes con el electrón, el muón y el tauón, de la familia de los leptones, los objetos que con mayor precisión podrían denominarse *partículas* por estar más cercanos al concepto de masa puntual, tienen todos carga eléctrica; cada uno de los seis quarks tiene carga, en magnitud 1/3 o 2/3 de la carga del electrón o de cualquiera de los leptones cargados. Si el sistema físico fuera un protón y un electrón (átomo de hidrógeno; recuérdese, de paso, que el protón, núcleo del hidrógeno, no es, rigurosamente hablando, una partícula elemental), cada una de las partículas interactuantes tendría carga de magnitud e, la una positiva y la otra negativa. Como resultado se atraen, en la misma forma que el sistema Tierra-Luna. He aquí la expresión correspondiente:

$$\boldsymbol{F} = -ke^2\mathbf{r}/r^3.$$

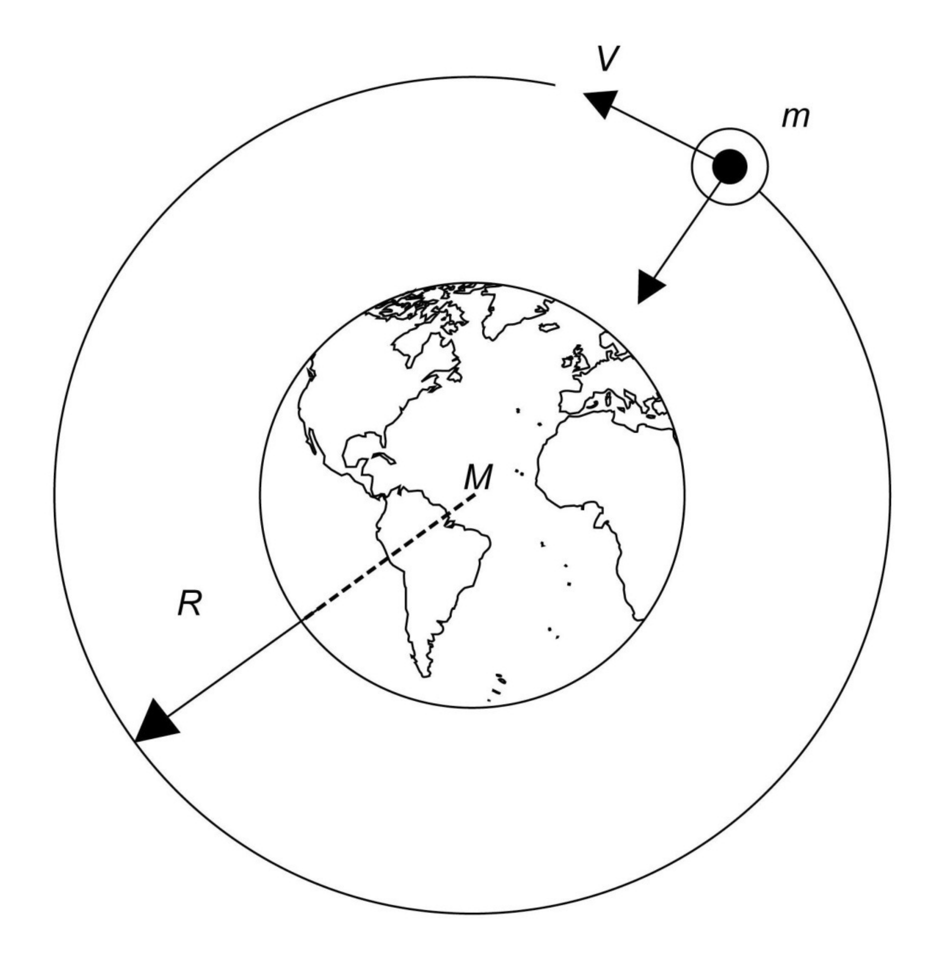
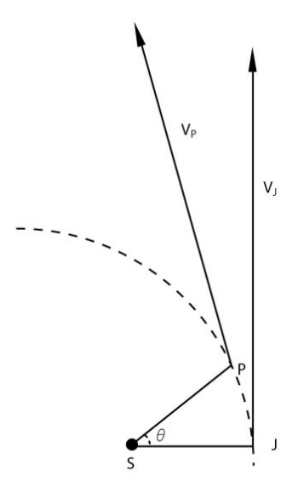


Figura 2.7. Movimiento de la Luna o de un satélite en trayectoria circular alrededor de la Tierra.

El mismo esquema de la figura 2.7 valdría, en principio, para representar el movimiento del electrón alrededor del protón, pero hay al menos dos graves problemas, el primero claramente señalado arriba, el segundo sugerido desde el comienzo: 1) en la teoría clásica, una carga acelerada (es el caso del electrón, el cual tendría una aceleración centrípeta) radía, es decir, emite energía electromagnética (en el esquema de la figura 2.9 terminaría por caer al centro, donde está el núcleo, en una trayectoria en espiral); 2) el principio de indeterminación ha prohibido *establecer* un esquema tan *determinista*. Por eso en la figura 2.9 se indica solamente la región *probable* de ubicación del electrón, probabilidad que se puede calcular rigurosamente a partir de la ecuación de Schrödinger.



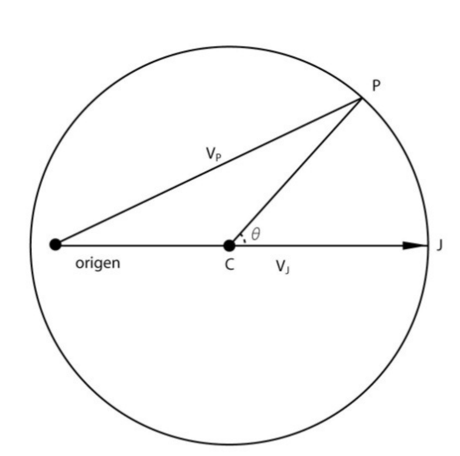


Figura 2.8. Movimiento de un planeta en trayectoria elíptica alrededor del Sol. A la derecha se muestra el 'espacio recíproco' o de momentos. El radio vector ***p*** (o para el caso la velocidad $\boldsymbol{V_p}$), en general variable en magnitud y dirección, describe una trayectoria circular alrededor del centro C en el espacio recíproco o de momentos; el origen O de los vectores velocidad coincide con C solamente cuando la trayectoria en el espacio de posiciones es circular, pero la curva que describe el vector variable ***p*** es circular para la Luna, los planetas o los meteoritos, no importa si la trayectoria es circular o elíptica.

Hay otros detalles que no se han tenido en cuenta, pero que no surten mayor efecto en un primer acercamiento al problema: por simplicidad, se han hecho algunas idealizaciones sobre el protón. La más obvia, se le ha considerado como si fuera un punto fijo de cuyo movimiento no hay que preocuparse. Una forma *elegante* de manejar esa simplificación exagerada es resolver lo que desde la mecánica newtoniana se llama el *problema de los dos cuerpos*, pero no se va a entrar aquí en los detalles del asunto: baste con decir que el problema se soluciona describiendo el conjunto protón – electrón en el *sistema del centro de masa*. Otro detalle que se ha pasado por alto es que el protón en realidad está formado por tres quarks; pero eso no va a agregar nada a la descripción exacta del problema atómico. Acerquémonos a él desde otro punto de vista.

Así como la posición y la cantidad de movimiento son el punto de partida para una descripción dinámica del movimiento, las energías de posición (energía potencial) y de movimiento (energía cinética) lo son para una descripción más sencilla de problemas como los que venimos tratando, pues en la mayoría de ellos, tanto de la mecánica clásica como de la cuántica, puede invocarse el *principio de conservación de la energía*. En el caso anterior, la energía de posición está dada por una variable u observable U y la de movimiento por otra que se suele denotar por T, mientras no dé lugar a confusión con el parámetro que mide la temperatura del sistema. Escribámoslas para el caso del electrón, asumiendo que el protón, por ser mucho más masivo, prácticamente no se mueve:

$$U = -ke^2/r;\ T = \tfrac{1}{2}mv^2.$$



Figura 2.9. Nube electrónica alrededor del núcleo en el átomo de hidrógeno. La densidad de la nube da la probabilidad de encontrar al electrón en cada región. La *nube electrónica* en la región cercana a 0.51 Å da la región de máxima probabilidad de ubicación en el estado fundamental o nivel más bajo de energía.

Estas expresiones, fácilmente aceptables para el movimiento planetario, hasta cierto punto pierden significado bajo el nuevo esquema, pero siguen siendo representaciones útiles. Para que la energía cinética o de movimiento tenga algún sentido, es preferible hablar de un *valor esperado* (semejante al valor medio) y representarlo por $<T>$. Hay algo que no tiene duda alguna: la suma de las dos cantidades nos da un observable, una cantidad medible más o menos directamente; explícitamente, la energía total, $E = U + T$, como veremos, puede tomar un conjunto de valores que son los *aceptados* (valores propios) en la nueva teoría, aunque cada una de las partes no toma valores definidos. De hecho U y T representan *operadores* y su suma, $\hat{H} = U + T$, también. La relación matemática es relativamente sencilla; si cada uno de los *estados* se representa por Ψ_n (en el esquema de Schrödinger), a cada uno de esos estados le corresponde un valor de energía E_n, el punto de partida es la *ecuación de valores propios*

$$\hat{H}\Psi_n = E_n\Psi_n.$$

La lectura de la expresión anterior es todavía más sencilla: mediante el operador de energía $\hat{H}$ obtenemos los posibles valores que puede tomar la energía E.

Este conjunto de ecuaciones en la presente y en situaciones similares se denominan *estados estacionarios*. $\hat{H} = U + T$ se denomina "operador Hamiltoniano". La gran hazaña del formalismo cuántico es predecir los valores permitidos para E, E_n, con absoluta precisión, siempre y cuando el operador que representa la energía potencial lo haga *fielmente*. No incomodaremos al lector escribiendo el operador que representa la 'energía cinética'. La potencial sigue siendo una expresión *común y corriente* que depende solamente de la posición r, salvo que esa posición no puede darse con absoluta precisión. Por eso, al igual que para la energía cinética, tendremos que hablar del valor esperado de la energía potencial.

Hay otra variable dinámica de mucho interés a la que ya se ha hecho referencia: *la acción*. Su definición, como se ha anticipado, es más abstracta, pero se intentará dar enseguida una vaga noción. Así como la energía clásicamente resulta de la acción de una fuerza en el espacio, o mejor, trabajo igual a fuerza por desplazamiento, siempre y cuando la fuerza vaya en la dirección del desplazamiento y sea siempre de la misma intensidad, *acción* es cantidad de movimiento por desplazamiento, $A = ps$, en condiciones equivalentes. Recuérdese que las unidades de la acción son las de energía por tiempo; pero también son el producto de masa por velocidad por longitud. Más rigurosamente, el concepto de acción envuelve una operación matemática denominada *integral*, la cual se realiza sobre todas las trayectorias posibles, de las cuales para un electrón libre se representan unas pocas en la figura 1.5; el cálculo conlleva además otras definiciones, en particular las que provienen de una generalización de la mecánica en la denominada *formulación hamiltoniana*. Se introducen de esta manera las llamadas *coordenadas generalizadas* y los correspondientes *impulsos* o momentos generalizados. La acción es la integral (o sumatoria) sobre una coordenada generalizada (espacio o tiempo o ángulo) de un momentum generalizado (cantidad de movimiento lineal o energía o momentum angular, etcétera). Baste con decir, para los propósitos que tenemos en mente, que la acción es el efecto prolongado de las *variables dinámicas* sobre las correspondientes coordenadas generalizadas (a lo largo de cada una de las *trayectorias* posibles); sus dimensiones coinciden con las del momentum angular.

Para no ahondar más en un tema que causa dificultades conceptuales aun a los expertos, desde un punto de vista cuántico, cuando se observa un sistema físico por un instante (durante un cierto intervalo de tiempo) en un segmento (intervalo espacial) de su posible ubicación o trayectoria, se modifica su acción; nótese que esa es precisamente la cantidad que aparece en las relaciones de indeterminación, tanto la que envuelve la cantidad de movimiento como la que envuelve la energía, : $\Delta p\Delta s \sim \hbar$, o $\Delta E\Delta t \sim \hbar$. Hay aquí una clave importante para la interpretación de la nueva teoría, como se verá más adelante.

2.6 Oscilaciones y ondas

Es usual que un curso básico de física cuántica empiece hablando de ondas. Por esa sola razón, esta sección es muy importante. Las ondas electromagnéticas se produjeron en el laboratorio gracias a *osciladores eléctricos*, en realidad, oscilaciones en cavidades que contenían campos eléctricos y magnéticos, o más precisamente, mediante cargas y corrientes que variaban en forma sinusoidal (*alterna*, si lo prefiere), generando campos electromagnéticos dentro de esas cavidades. Empecemos por oscilaciones mecánicas.

Hay muchos tipos de osciladores, de los cuales el más simple es el denominado *oscilador armónico*. *Movimiento armónico simple* es el que ejecuta una masa atada a un resorte en condiciones ideales, después de desplazarlo levemente de su posición de equilibrio. Aunque el caso más sencillo de describir no es el que ilustra la figura 2.10, sí es el más fácil de visualizar. Proyectando la sombra del movimiento circular uniforme de un objeto en las direcciones *y* o *x*, se obtienen movimientos oscilatorios (armónicos simples).

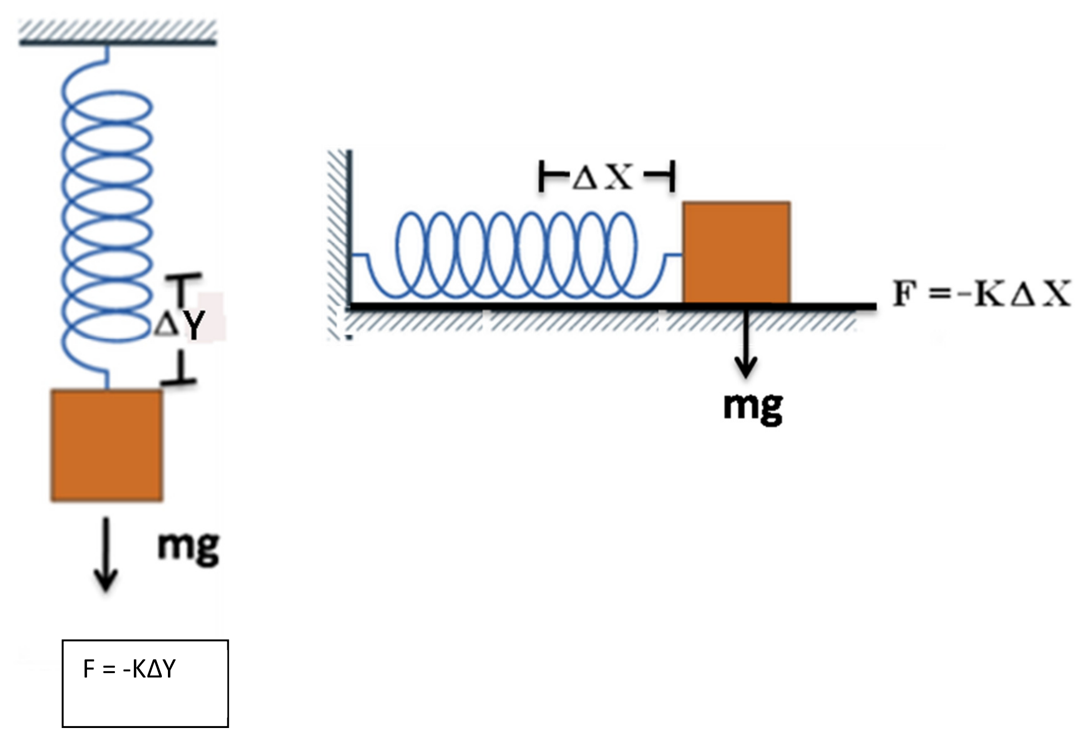


Figura 2.10 a) Oscilador vertical. b) Oscilador horizontal. La característica común es que la fuerza *recuperadora* es proporcional a la deformación, lo cual es válido en primera aproximación, vale decir, si la deformación es pequeña. En el primer caso, el peso mg es compensado por una deformación *inicial*; en el segundo, por la fuerza normal. Se supone que las fuerzas de roce y de fricción con el aire son pequeñas comparadas con la fuerza elástica debida al resorte.

Una forma sencilla de describir el movimiento oscilatorio periódico en el caso más simple (MAS) es descomponer el movimiento circular uniforme, también periódico, como ilustra la figura 2.12. Para ello es conveniente introducir el concepto de velocidad angular ω, de tal suerte que el ángulo barrido después de transcurrir un cierto tiempo t es: $\vartheta = \omega t$. Si el punto de partida del móvil fue B, eso quiere decir que $x = R\cos(\omega t)$ y $y = R\,\mathrm{sen}(\omega t)$. Las componentes de velocidad y de aceleración se obtienen de manera similar por descomposición.

A partir de movimientos oscilatorios se pueden generar ondas en diferentes medios materiales. La clave está en transmitir esos movimientos oscilatorios de un punto a otro en ese medio. Vamos a ilustrar brevemente a continuación la propagación de ondas bajo diversas circunstancias.

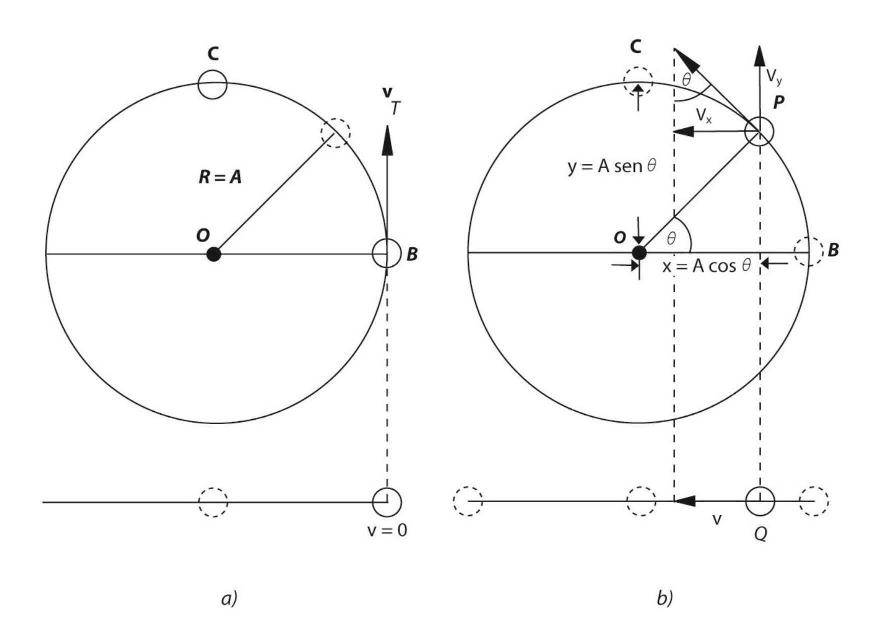


Figura 2.12. El movimiento circular uniforme se puede visualizar como la superposición de dos movimientos armónicos simples, uno en dirección *x*¸ otro en dirección *y*, *desfasados* en π/2.

Se suele decir que una onda mecánica es una perturbación que se propaga en un medio material con determinadas propiedades elásticas. Al contrario de lo que ocurre con una partícula, a la que clásicamente le podemos asignar posición y velocidad entre otras cantidades físicas, una onda no está localizada: es un fenómeno que, en términos clásicos, lo asociamos con un *continuum*, un *medio continuo*, aunque bien sabemos que ese medio, cualquiera que sea, está constituido por átomos o moléculas con separaciones que dependen del estado y la composición específica del medio. La propagación de una onda en una cuerda es un claro ejemplo para una dimensión: los puntos en la cuerda están conectados de alguna manera; en el caso sencillo de una cuerda muy delgada, ésta puede visualizarse como una cadena de átomos, aunque para ilustrar el fenómeno también serviría cualquier cadena hecha de eslabones o las espiras entrelazadas que forman un largo resorte. En dos dimensiones, una membrana elástica es el mejor ejemplo de medio portador, aunque el más fácil de visualizar sea la superficie del agua contenida dentro de un ancho recipiente sin tapa; una cubeta es la materialización práctica más sencilla en el laboratorio. En tres dimensiones, un sólido cualquiera, un líquido o una mezcla de gases como el aire pueden servir de medio *continuo*.

Empecemos con la cuerda. Si una parte de ella se agita, desplazándola transversalmente, esa agitación se comunica o transmite a otros puntos de la cuerda, precisamente por la conexión que hay entre los diversos puntos que la conforman. La cuerda está hecha de un material elástico que se puede someter a tensión por sus extremos; es lo que se hace con los instrumentos musicales *de cuerda*.

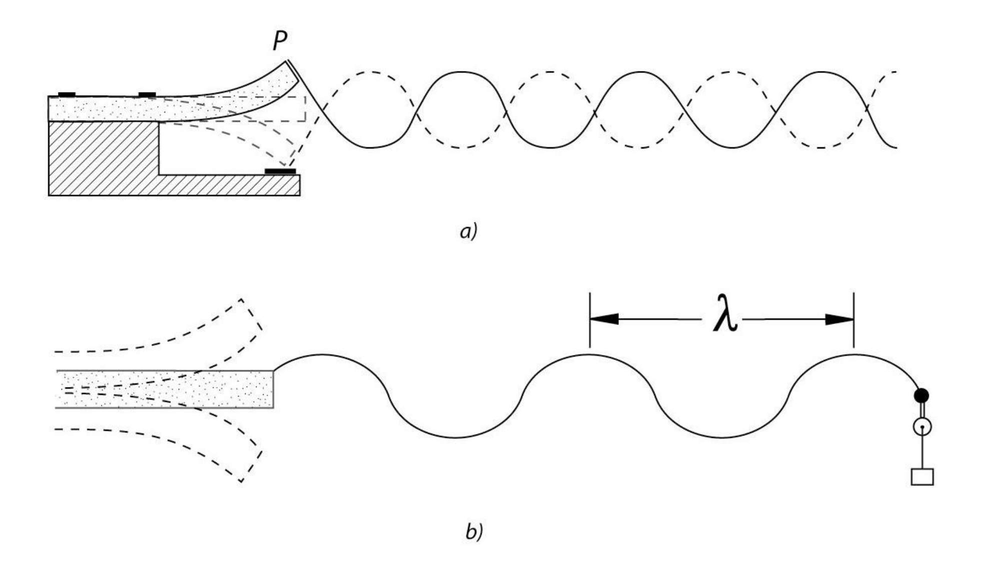


Figura 2.13. Ondas estacionarias en cuerdas, generadas mediante diapasones de diferentes frecuencias. La velocidad de propagación de la onda está determinada por la densidad (masa por unidad de longitud) de la cuerda y por la tensión a que está sometida. En la figura a) la cuerda está libre por el extremo derecho. En la b) el peso tensiona la cuerda: hay que ajustar el valor del peso para formar una onda estacionaria.

Mediante un diapasón conectado a un extremo de una cuerda cuyo otro extremo puede estar fijo a un peso que causa una cierta tensión, por medio de una polea, por ejemplo, pueden generarse ondas. Acomodando tensiones y longitudes para diapasones de diferentes frecuencias, es posible generar ondas estacionarias muy diversas, como las que se ilustran en la figura 2.13.

Ya que hablamos de diapasones, nótese que a menudo su vibración se acopla a una caja vacía en su interior, buscando que se produzca un interesante fenómeno característico de las oscilaciones y las ondas: *la resonancia*. Es lo que ocurre, por ejemplo, con las vibraciones de los instrumentos de cuerda frotada, entre los que destaca el violín, o algunos de percusión como el tambor. En los instrumentos metálicos, de viento o de percusión, el acople es más complejo.

Los medios materiales en que se propagan las ondas mecánicas pueden ser sólidos, líquidos, gaseosos o plasmas, cuatro estados de la materia. (Hoy se habla de un quinto, el condensado de Bose-Einstein.) Decimos que *una onda se propaga*, y mecánicamente imaginamos que es la perturbación o agitación lo que se transmite, a una cierta velocidad característica. Ésta depende, en primera instancia, del medio en que se propaga la perturbación, de la tensión a que está sometida la cuerda, por ejemplo, y de su densidad (composición y grosor).

Es fácil observar la propagación de ondas en un trozo de gelatina: distintas texturas dan diferente velocidad de propagación. A lo largo de un tronco de madera suficientemente extenso puede percibirse la propagación de una onda sonora con una velocidad mayor que en el aire. Se esperaría que es más ilustrativo hacer el experimento con una varilla metálica: dando un golpe en un extremo se transmite rápidamente una señal sonora al otro extremo. La velocidad de propagación es demasiado rápida para ser observada a simple vista.

Un largo tubo vacío cuya superficie es de vidrio, preferiblemente de sección circular, nos permite propagar ondas sonoras a través del aire en una dirección muy precisa. Podría ponerse a vibrar un diapasón colocado en un extremo (abierto) del tubo y percibir las ondas en el extremo opuesto (cerrado), si la longitud del tubo fuera apropiada: son de la misma frecuencia, más intensas que cuando simplemente viajan en el aire debido a un interesante fenómeno llamado *resonancia*. Esas son ondas longitudinales: a diferencia de la cuerda, en la cual las oscilaciones de las partículas son transversales, las oscilaciones de cada una de las capas de aire se hace en la misma dirección en que avanza la onda sonora. Véase la figura 2.14. Nótese que estamos hablando ya de *vibraciones* de un *oscilador*. Los átomos solían visualizarse clásicamente como *osciladores*. Para ciertos propósitos, la aproximación es buena.

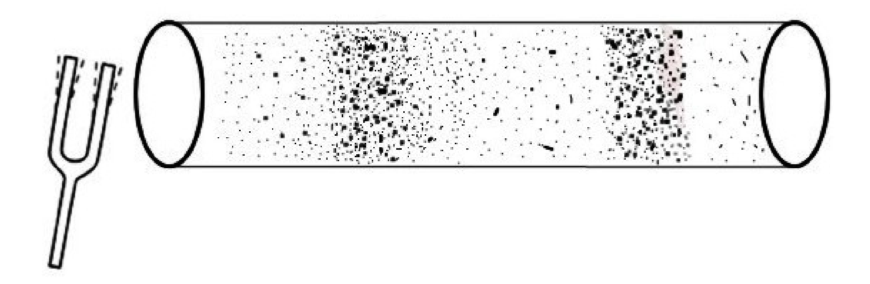


Figura 2.14. Ondas longitudinales que se propagan a lo largo de una columna de aire en un tubo con superficie de vidrio, para localizarlas mejor y evitar su disipación. El diagramador dibujó algunas *partículas* de aire demasiado grandes, lo que facilita imaginar lo que ocurre en otras circunstancias. Las ondas sonoras se generan mediante las vibraciones de un diapasón de la frecuencia que se desee.

Pero también es posible observar ondas de torsión, como las que se muestran en la figura 2.15.

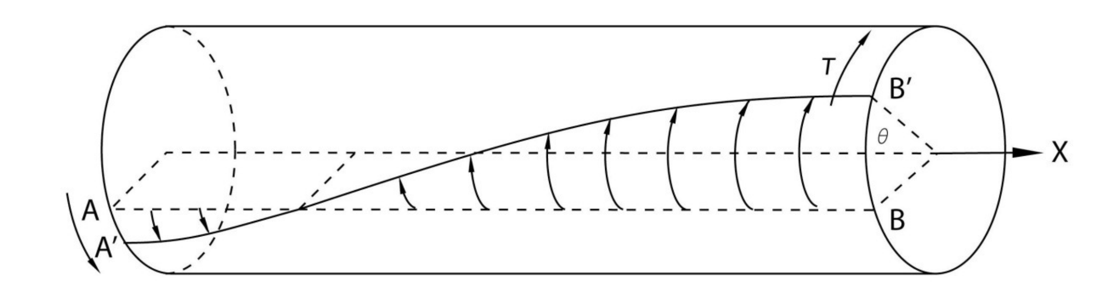


Figura 2.15. Ondas de torsión

Para visualizar mejor lo que ocurre, imagine que se anclan a una varilla metálica trocitos rectos de alambre grueso en dirección transversal. La torsión de una sección transversal de la varilla se transmite a cada una de las secciones sucesivas: es fácil ver a qué velocidad avanza esa perturbación observando el movimiento torsional de los trozos de alambre, aunque por supuesto ellos van a afectar la velocidad de propagación, dado que modifican drásticamente la dinámica de cada sección de la cuerda.Hay muchos experimentos sencillos que pueden hacerse con ondas.

Igualmente se encuentran muchos cursos con autocontenido en la red. Como ejemplo, véase el sitio:

http://web.educastur.princast.es/ies/juananto/FisyQ/MovOnd/index.htm

Las ondas sonoras que se producen en los instrumentos de cuerda o de viento se acoplan invariablemente a otro medio para propagarse y llegar al receptor: el aire es el medio de propagación, por excelencia; en él se forman generalmente ondas esféricas, cuya intensidad decae con el cuadrado de la distancia, un fenómeno típico de conservación de energía, acompañado en mayor o menor grado de un fenómeno de origen diferente, en el que igualmente decae la señal: la disipación. La disipación está ligada a otro interesante tema: lo que ocurre realmente en el interior de cada una de las partes de materia, los átomos y moléculas; estos responden permanentemente a las perturbaciones y dan lugar, entre otras, a un tipo de ondas de trascendental importancia: la llamada radiación electromagnética. Uno puede imaginar que las ondas electromagnéticas en los átomos, la luz que emiten, son como la que ilustra la figura siguiente, en la cual se indica que a gran distancia esa onda *esférica* se vuelve *plana*. *Milagrosamente* el modelo funciona en la mayoría de los casos.

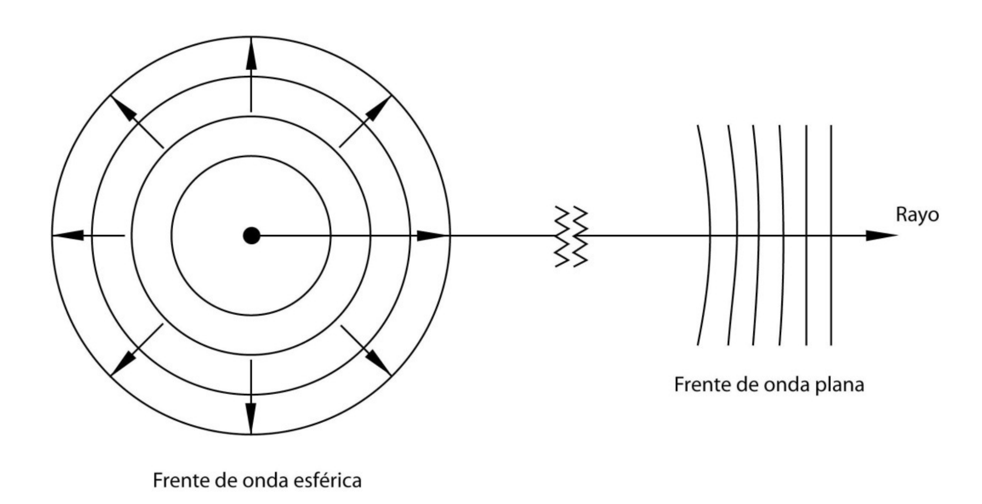


Figura 2.16. Onda esférica que se vuelve plana a gran distancia.

Cuando se concluyó que la luz es un fenómeno ondulatorio, se encontró lo que 'suponemos obvio': la luz se propaga más rápidamente en el aire que en el vidrio u otro medio material cualquiera; es más fácil correr contra el aire que nadar contra el agua. Pero, ¿por qué habría de ser 'obvio', si acabamos de decir lo contrario sobre las ondas sonoras? A mayor densidad del medio, la velocidad de una onda mecánica como el sonido aumenta. La respuesta es sutil: las ondas de luz son un tipo muy particular de ondas. Para empezar, observe que pueden propagarse sin necesidad de medio material alguno: al menos eso ocurre en los espacios intergalácticos donde la densidad de materia es extremadamente baja. Por el contrario, las ondas sonoras no pueden propagarse en el vacío. Dicho en otras palabras, la luz no es el tipo de onda mecánicamente producida que acabamos de discutir. O mejor: *El señor es sutil* (*Subtle is the Lord*,

reseña sobre Einstein escrita por Ronald W. Clark.).Volveremos a este asunto más adelante, no sin antes mencionar que para resolver el problema en el pasado se supuso que había un medio extraño, imponderable, al que denominaron *éter*, hoy en día desechado por la física ortodoxa.

La noción de onda es menos intuitiva que la de partícula; en las ondas mecánicas hay una característica común: las oscilaciones, las cuales se transmiten de uno a otro punto gracias a la elasticidad del medio. Se verá que hay complicaciones aún mayores, y diferencias radicales en su comportamiento, si se le compara con el de partículas. La más importante, para los fenómenos que se van a considerar posteriormente, es el siguiente: las ondas exhiben un fenómeno peculiar, el de superposición o interferencia, ausente por completo en las partículas clásicas, sean ellas balas de cañón, diminutos proyectiles o, mejor aún, cuerpos tan gigantes como una galaxia (también partículas desde un punto de vista *cosmológico*).

Clásicamente, al menos en lo que se refiere a las ondas mecánicas (la luz, como se dijo, es caso aparte), una onda simple resulta de un fenómeno oscilatorio. En la figura 2.14, cuando se pone a vibrar un diapasón y se le ata al extremo de una cuerda, preferiblemente liviana, se pueden percibir dos ondas: la sonora, que se propaga en el aire, con la frecuencia característica del diapasón y la velocidad propia del sonido en el aire a la temperatura a que se encuentre, y una onda a lo largo de la cuerda; ésta última viajará con una velocidad que depende de la tensión a que esté sometida la cuerda y de su densidad (masa por unidad de longitud). Intuitivamente puede entenderse que a mayor tensión y menor densidad (mayor aceleración y menor inercia), la velocidad de propagación sea mayor.

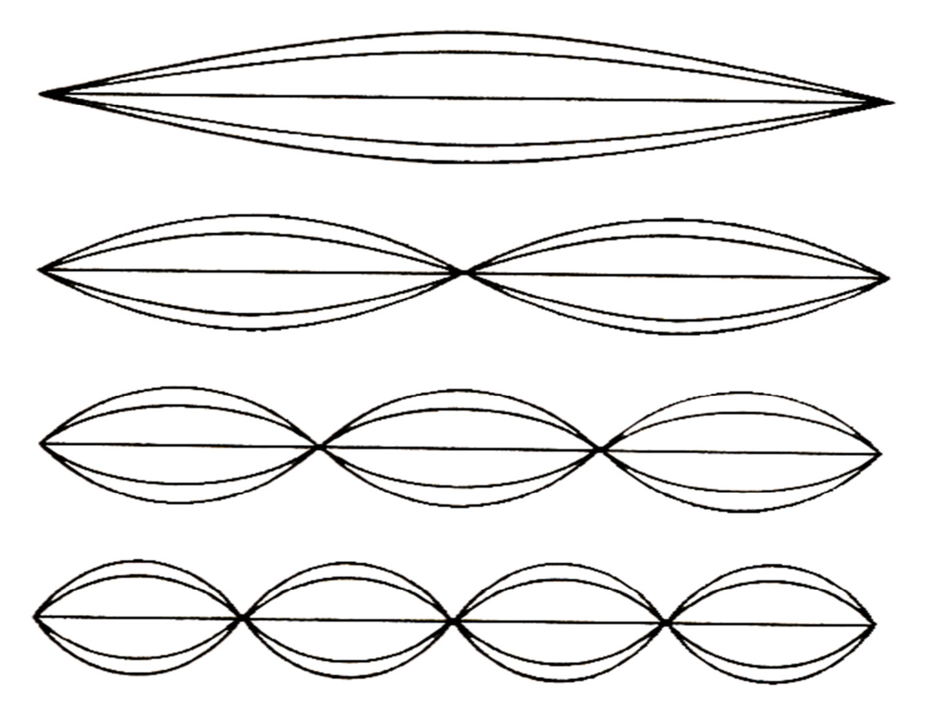
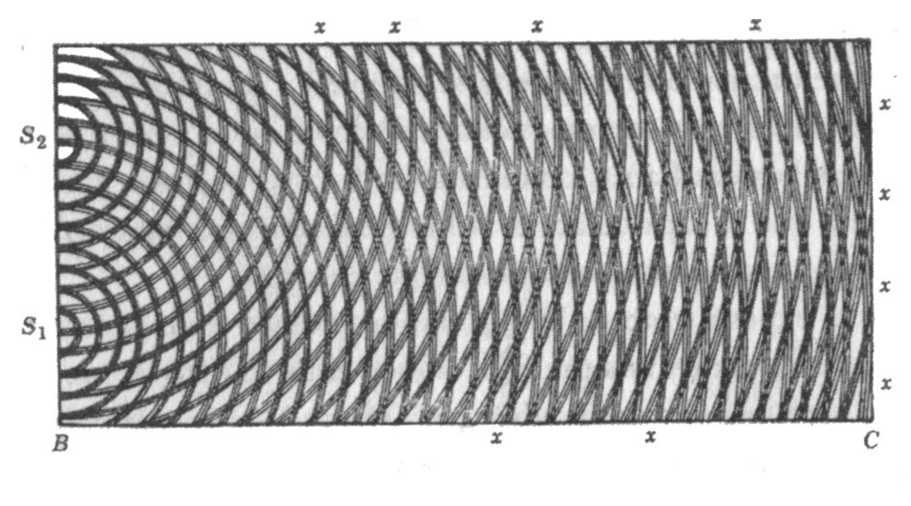


Figura 2.17. Ondas estacionarias en una cuerda fija por sus dos extremos. En el primer caso, $L = ½ \lambda$; en el segundo, $L = \lambda$; en el tercero, $L = (3/2) \lambda$; para el cuarto, $L = 2\lambda$.

Bajo ciertas condiciones, en la cuerda se forma una *onda estacionaria*. Es como si partes de la cuerda, separadas por medias longitudes de onda, vibraran al unísono; de hecho, así es. Consideremos un caso más sencillo. Sujétese una cuerda *liviana* (de baja densidad) por dos extremos, tensionándola, no muy fuertemente para que se pueda observar mejor y para que no se rompa. Al presionar transversalmente por el centro de la cuerda y liberarla repentinamente, la cuerda va a oscilar: todos los puntos de la cuerda irán de abajo hacia arriba durante medio ciclo y de arriba hacia abajo en el medio ciclo siguiente. Obsérvese que la cuerda tiene media longitud de onda, $L = ½ \lambda$. Ahora presiónese en sentidos opuestos a $(1/4)L$ y $(3/4)L$, buscando que el centro permanezca estático: se observa que, mientras la mitad de los puntos de la cuerda se mueven en una dirección, los de la otra mitad se mueven en dirección contraria. Se ha logrado formar una onda estacionaria con una longitud de onda λ igual a la longitud de la cuerda. (Véase la figura 2.17.)

Sin necesidad de hacer la demostración matemática, conviene advertir que la onda en el caso anterior es una superposición de dos ondas: una que viaja hacia la derecha y otra exactamente igual en amplitud y frecuencia que viaja hacia la izquierda. La amplitud de la onda resultante es el doble de la de cada una de sus componentes, un efecto lineal bastante obvio; la intensidad va a ser el cuádruplo. El fenómeno se denomina superposición de ondas, y vale para todo tipo de ondas que se propaguen en medios lineales. Ya se dijo que la *superposición* va a ser de gran importancia en la descripción de los fenómenos cuánticos.



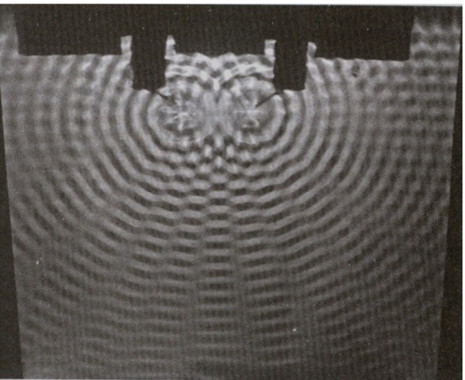


Figura 2.18. Patrón de interferencia de ondas en el agua. El primer caso (arriba) representa una situación idealizada, ilustrada originalmente por Young, para las ondas de luz; el segundo (abajo), es una fotografía de ondas en el agua durante un experimento real (laboratorio del PSSC, Physical Sciences Study Committee, 1964). El primer dibujo puede mirarse a ras, de izquierda a derecha como recomendara Young, para ver mejor el efecto de interferencia. Volveremos a este experimento en el capítulo tercero.

De manera similar a la superposición de ondas, en el fondo lo mismo pero de manera más general, funciona el fenómeno conocido como interferencia de ondas. Para ilustrarlo, es mejor recurrir a ondas bidimensionales más extensas que las ondas en una cuerda (éstas, al igual que las ondas sonoras en un tubo, son un tipo muy particular de ondas en una dimensión). Las ondas en el agua son convenientes para visualizar lo sustancial en el experimento propuesto.

Si se pulsa, ojalá armónicamente, la superficie del agua, se forman ondas concéntricas o circulares. Piénsese en pulsar *en fase* dos corchos mediante un motor. Se formarán dos ondas con frentes circulares que *interfieren*. Con algunas precauciones y trucos, puede observarse que en algunas partes interfieren constructivamente y en otras lo hacen destructivamente. El fenómeno se ilustra esquemáticamente en las figuras 2.18, en la primera, para una situación idealizada, a partir de un dibujo hecho por Young para explicar el fenómeno, en la segunda para un caso real: dos puntas que se hacen oscilar vertical y sincrónicamente, perturbando la superficie del agua. Otra forma de hacerlo, para garantizar que las dos fuentes estén en fase, consiste en utilizar una barra o rodillo para producir *ondas planas* en la cubeta de ondas. El frente de ondas planas avanza; más adelante, se puede colocar un obstáculo con dos ranuras, dando lugar a dos frentes de onda en fase. Eso es lo que se ilustra en la figura 2.18, pero con ondas de luz. Éstas son más

interesantes que las de agua, utilizadas en estas notas sobre todo por la facilidad para materializarlas y por la riqueza conceptual que encierran.

Se pueden apreciar en esta última figura dos fenómenos muy similares, estrechamente relacionados: interferencia y difracción.

La difracción es una especie de interferencia generalizada, aunque no es fácil explicarlo en pocas palabras. Para simplificar, digamos por ahora simplemente que la difracción es la propiedad de expandirse o ensancharse que tiene la onda. Eso le permite “doblar” esquinas.

Agustín Fresnel y Thomas Young, independientemente, hicieron experimentos que confirmaron plenamente el carácter ondulatorio de la luz, de los rayos de luz. Fresnel, un ingeniero de caminos, elaboró además una teoría matemática bastante compleja. Se volverá a las ondas de luz al final del capítulo, cuando se haya hecho una introducción a los fenómenos electromagnéticos, que son los que precisamente dan lugar a ese tipo peculiar de ondas.

La figura 2.19 es similar a otras que el lector seguramente encuentra en diversas fuentes, entre otras, algunas de las que se mencionan en la sección 3.4. Tiene adicionalmente una representación del cambio semi-cuantitativo de la intensidad en las distintas franjas.

2.7 Rangos permitidos para los fenómenos físicos bajo diversos marcos teóricos

La teoría de relatividad debe su nombre a que uno de sus postulados es precisamente el postulado de relatividad: todos los sistemas de referencia inerciales son equivalentes, o mejor, las leyes de la física deben tener la misma forma en todos los sistemas que se muevan unos respecto de otros con velocidades uniformes. Pero su nombre está mal asignado, como el mismo Einstein lo reconoció: es una teoría de invariantes, de cantidades que no cambian. El segundo postulado afirma que la velocidad de la luz, c, la máxima permitida, es la misma en todo sistema de referencia: es una constante física fundamental. Es, pues, un invariante; todavía más, es una velocidad límite.

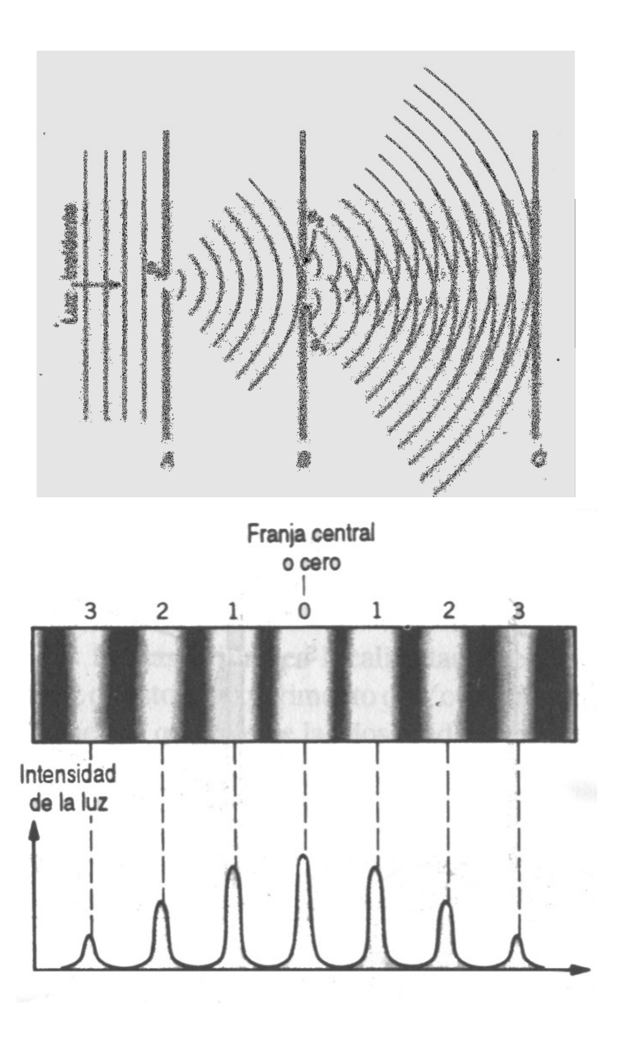


Figura 2.19. Ondas de luz esféricas que dan lugar a dos frentes de ondas mediante dos agujeros o dos rendijas verticales formando un patrón de interferencia, con franjas alternas brillantes y oscuras. La figura inferior ilustra la variación de la intensidad, proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda en cada punto.

De la misma manera, *h* es una constante física fundamental. También es una cantidad límite, esta vez por debajo. Hay otra muy importante: la carga *e*, coincidencialmente la carga del electrón. Seguramente hay una relación entre las tres, pues es bien conocido ya que los llamados «rayos de luz» o fotones son producidos por la interacción entre partículas cargadas. En otras palabras, una partícula elemental cargada interactúa con otra también cargada enviándole fotones que viajan a la velocidad de la luz, los cuales a su vez son cuantos de energía. La otra le responde en la misma forma. La mínima acción que se puede intercambiar en la interacción es precisamente *h*. El intercambio de energía durante el intervalo de tiempo que dura la interacción debe satisfacer también la relación de indeterminación ya escrita: $\Delta E \Delta t \sim \hbar$.

Las dos expresiones anteriores y otras equivalentes establecen un mínimo para la acción que es posible transmitir, por ejemplo, en un proceso de medición, un proceso que proviene de una interacción entre el observador y el sistema físico. El inverso de un mínimo es un máximo; Alberto de la Torre, en el interesante ensayo divulgativo ya mencionado en la introducción, el cual inspiró mucho de estas notas, le denomina *inacción*. Así como la constante de acción $\hbar$ establece un límite al mínimo permitido de acción que se transmite, su inverso establece un límite máximo de *inacción*. La constante de velocidad c establece un límite máximo a la velocidad de propagación de cualquier tipo de señal que se envíe de un emisor a otro sistema que se denomina receptor. Al graficar sobre un plano los diversos eventos que pueden ocurrir en el universo de fenómenos físicos, estos estarían acotados por el máximo de inacción y el máximo de rapidez, como indica el siguiente diagrama, una simplificación del propuesto por de la Torre; llevemos, como hace él, las unidades de *inverso de inacción* a un supuesto eje horizontal, y las de *rapidez* al eje vertical. En tal caso, el cajón izquierdo inferior (I,I) incluiría los fenómenos que ocurren a velocidades bajas comparables con la de la luz y cuando el inverso de la acción es muy pequeño comparado con el inverso de la constante de Planck; el de la derecha, inferior (D,I) correspondería a los que más nos interesan en este corto ensayo: son fenómenos que envuelven también bajas velocidades, pero el inverso de la acción es comparable a $1/h$ (el caso extremo ocurriría precisamente en el extremo derecho del esquema). Sin que los otros dos rangos de fenómenos, los de los cajones superiores, nos interesen por ahora, envuelven velocidades comparables a la de la luz, en un caso a baja inacción (izquierdo superior, (I,S)), y en el otro, del orden de $1/h$ (derecho superior, (D,S)). Obsérvese que los fenómenos físicos ¡caen en uno u otro rango, pero no por fuera de ellos! Simplifiquemos la nomenclatura, representando: por C, los fenómenos clásicos no relativistas; por Q, los cuánticos a bajas velocidades; por R, los clásicos a altas velocidades y por RQ, los fenómenos cuánticos que envuelven altas velocidades (generalmente, el rango de fenómenos que se estudian en la física de partículas elementales, o física de las altas energías). Rigurosamente hablando, la mecánica cuántica relativista debería incluirlos a todos, pero no se han logrado mayores éxitos en ese terreno: por ahora, en RQ están descritos fenómenos que envuelven partículas elementales a velocidades ultrarrelativistas; en Q caerían también los fenómenos clásicos a bajas velocidades, pero no es indispensable hacerlo con aquellos en que h resulta despreciable, o mejor, cuando la *inacción*, en unidades del inverso de $1/h$, es pequeña frente al máximo permitido para esa *variable*. Cuando se quieren describir objetos macroscópicos inmensos que se mueven a altas velocidades, las galaxias lejanas por ejemplo, se dice que la teoría de relatividad, o lo que es lo mismo, la teoría de gravitación *se ha generalizado*; no voy a ocuparme de ese asunto. Insistamos en que *falta mucho para generalizar* la teoría de gravitación, es decir, para disponer de una *gravitación cuántica* consistente. Algo similar puede decirse del modelo estándar, la teoría más avanzada y exitosa de las partículas elementales, aunque se han logrado muchos avances en *supercuerdas*.

Si los límites máximos de velocidad (c) y de inacción (h^{-1}) restringen los fenómenos dinámicos, por supuesto que el espacio y el tiempo también están restringidos cuando ellos no son absolutos. Como ya se advirtió, es impensable concebir distancias mayores que las del radio del universo; o tiempos mayores que la edad del mismo. Se pueden fijar cotas mínimas para distancias y tiempos,

pensando en las partículas de menor tamaño que se conocen y las de más corto tiempo de decaimiento. Esto nos lleva a consideraciones que eludimos, por brevedad y porque no se sabe mucho de las cotas en esta dirección.

	RC	RQ
c	I,S	D,S
	Mecánica clásica relativista	Mecánica cuántica relativista
	Mecánica clásica no relativista	Mecánica cuántica no relativista
I,I	D,I	h^{-1}

Figura 2.20. Diagrama de los fenómenos físicos y teorías que los describen. No debe perderse de vista que la frontera entre uno y otro rango de fenómenos es difusa.

2.8 La gran síntesis de Newton y de Maxwell

La mecánica, la electrodinámica y la física estadística clásicas son el resultado de tres siglos de avance espectacular de la ciencia moderna en la descripción de los fenómenos físicos. La última dio una sustentación "microscópica" a los fenómenos termodinámicos, más exactamente, a la termodinámica fenomenológica; gracias a ella se creía que *finalmente* se había logrado entender lo que era el *calor*, y se introdujo con rigor una cantidad física no medible directamente pero envuelta en todo tipo de fenómenos físicos: la entropía.

En la tumba de Ludwig Boltzmann, en Viena, hay una lápida que reza: $S = k \log W$. W se refiere al número de estados accesibles del sistema físico; k es, por supuesto, la famosa constante de Boltzmann; la operación $\log W$ ordena tomar el logaritmo del número de estados; no voy a ahondar en el procedimiento para hacerlo, por razones de espacio y porque el tema podemos evadirlo para *simplificar*: nos lleva a un campo que cae por fuera de estas notas. Pero la enseñanza es muy clara: a medida que aumenta el número de estados accesibles, crece la entropía del sistema. Será imperativo ahondar en el asunto si, como lo tengo planeado, acometo la tarea de redactar el segundo ensayo prometido con una orientación más dirigida a resaltar la *segunda revolución cuántica*, específicamente, la *información* vista cuánticamente.

Terminemos esta breve referencia a la física estadística con una observación: la relación de Boltzmann sigue siendo válida, hasta donde sabemos, en la teoría cuántica, tomando las debidas precauciones. El denominado *operador densidad* (un ente cuántico más complejo que el *vector de estado*) es el *protagonista* principal.

A continuación se intentará resumir en algo más que unas frases o unas pocas ecuaciones lo que las teorías de Newton y de Maxwell nos dicen; la primera, sobre las leyes que rigen el movimiento, descrito clásicamente, en particular la que se refiere a la conservación de la cantidad de movimiento; la segunda sobre las leyes que rigen la interacción entre la materia y la radiación, las llamadas leyes de la electrodinámica. La primera es pilar fundamental en la física estadística, también en los procesos o interacciones elementales. Las segundas toman una forma matemática que demanda conocimientos de cálculo vectorial y no haremos más que enunciarlas cualitativamente. Recomiendo al lector leer el capítulo *Maxwell y los bichos raros* del libro de Sagan: *El mundo y sus demonios* y releer (si ya se hizo una primera incursión) *Evolución de la física*, referido desde la introducción a este ensayo. Los dos pueden encontrarse en nuestra página web.

2.8.1 Newton y la mecánica

A la ley de gravitación de Newton se suman sus tres leyes de la mecánica: el principio de inercia, la ley que rige el cambio de movimiento (la interacción o fuerza es la responsable) y el principio de acción y reacción (interacción entre parejas). A las tres ya se ha hecho referencia; recuérdese que la última simplemente establece cómo, cuando interaccionan dos partes de un sistema físico o dos sistemas físicos cualesquiera, la fuerza que una parte hace sobre la otra es igual y opuesta a la que la segunda hace sobre la primera. Téngase en cuenta que eso es cierto, no importa qué tan grande o tan pequeña sea una de las partes. Dos partículas elementales interactuando (dos electrones, por ejemplo) tendrán que satisfacer el principio de acción y reacción, aunque su comportamiento antes, durante y después de la interacción deje de ser clásico. De hecho, la satisfacen, pero en tal caso es preferible visualizar lo que ocurre en forma consistente con la nueva teoría válida a nivel elemental, en la que el concepto de fuerza pierde validez, cediendo su lugar, como ya se dijo, a la *interacción*. La descripción que sigue, aunque parte de la formulación clásica, es un intento en esa dirección.

Escrita en la forma $\boldsymbol{F} = d\boldsymbol{p}/dt$, el cálculo diferencial nos permite reescribir la ecuación de movimiento para un sistema físico cualquiera de la siguiente manera: $d\boldsymbol{p} = \boldsymbol{F}dt$; la fuerza puede estar variando, de hecho lo estará, en cada instante de tiempo; el procedimiento que se sigue, el inverso del cálculo diferencial, puede ser complicado para algunos de los lectores, así que es preferible recurrir a un pequeño truco. Cuando la fuerza neta sobre una partícula es aproximadamente constante, lo cual puede ser aproximadamente válido durante un corto intervalo de tiempo Δt, el cambio en la cantidad de movimiento de la partícula debido a esa fuerza total vendrá dado por: $\Delta\boldsymbol{p} \approx \boldsymbol{F}\Delta t$. Recuérdese que esa última cantidad es el *impulso suministrado por la fuerza*.

Cuando choquen dos electrones, el uno hará sobre el otro una fuerza repulsiva (ley de Coulomb) exactamente igual y opuesta a la que hace el segundo, el otro, sobre el primero. Simbólicamente puede escribirse: $\Delta\boldsymbol{p}_1 = \boldsymbol{F}_1\Delta t$; en la misma forma, $\Delta\boldsymbol{p}_2 = \boldsymbol{F}_2\Delta t$; al sumar las dos expresiones, recordando que $\boldsymbol{F}_1 = -\boldsymbol{F}_2$ (principio de acción y reacción) y que el intervalo de tiempo, el tiempo de interacción que se considere (muy pequeño, para el caso), tiene que ser el mismo para los dos, se obtiene algo aparentemente muy simple, pero de enorme utilidad y de gran trascendencia:

$$\Delta \boldsymbol{p}_1 + \Delta \boldsymbol{p}_2 = \boldsymbol{0};$$

¡el resultado es maravilloso! Esta es en esencia la demostración de que la cantidad de movimiento total de dos objetos (o dos partes de un objeto) que interactúen entre sí se conserva:

$$\boldsymbol{p}_{1i} + \boldsymbol{p}_{2i} = \boldsymbol{p}_{1f} + \boldsymbol{p}_{2f},$$

en donde se han utilizado los subíndices i y f para referirse a cantidades iniciales y finales respectivamente ($\Delta \boldsymbol{p}_1 = \boldsymbol{p}_{1f} - \boldsymbol{p}_{1i}$; $\Delta \boldsymbol{p}_2 = \boldsymbol{p}_{2f} - \boldsymbol{p}_{2i}$). Hagamos una pausa para explicar de una vez por todas lo que solemos hacer.

Preparando el terreno para la terminología cuántica, se han denominado i y f los estados "inicial" y "final". Esto quiere decir: mentalmente se puede dividir una historia en "cuadros" o fotografías parciales de lo que está ocurriendo y "armar" la historia a partir de esos trozos de información; en cada "etapa" del proceso, en el intervalo de tiempo Δt entre un cuadro y el siguiente, ha ocurrido un cambio o una transformación en cada parte del sistema interactuante, los dos electrones para el caso; entre dos cuadros sucesivos hay una parte de la historia, con un comienzo y un final; entre dos trozos de historia sucesivos, se retoma el final para el siguiente cuadro; esto se puede hacer, en principio, clásicamente, tan detallado y tantas veces como se desee. Resumamos el resultado: bien sea para cada trozo o para la historia completa, mientras lo que se tenga puesto en escena sean los dos electrones interactuando y nada más, el resultado total es el mismo: la suma de las cantidades de movimiento de las dos partes es la misma siempre, no importa dónde se ponga el comienzo y dónde se decida colocar la escena final, si no ha habido otros actores. Tal vez pueda afirmarse, sin exageración alguna, que ese procedimiento es la clave del éxito de la física teórica.

Lo más interesante es que esto se puede hacer, por superposición, para muchas otras partes... en últimas, para todo el Universo; recuerde que puede tomar un sistema cualesquiera y dividirlo en dos partes. Hágalo mentalmente ahora para dos trozos de materia que interactúan de alguna manera, no importa cómo: no hemos recurrido a la forma específica de la fuerza (léase interacción) en la deducción anterior. Piense en una reacción química, en la que dos átomos o moléculas se transforman. Si se lograra *aislar* la reacción, lo que mentalmente siempre es posible, no importa si se produce o se absorbe calor durante la reacción, siempre y cuando se incluya el subsistema que absorbe o suministra el calor sobrante o faltante, el principio de conservación arriba expresado sigue siendo válido.

Si fuera una granada o el Universo entero que explota en dos fragmentos, la suma de las cantidades de movimiento de los dos fragmentos igualará a la cantidad de movimiento de la granada completa o del Universo entero... si no ha habido otra fuerza externa que afecte el movimiento de la granada o de cada uno de los dos fragmentos de Universo, aunque es difícil imaginar una situación para este caso y el concepto de fuerza se ha diluido por completo. Por facilidad, imagine la granada sobre una superficie horizontal sin rozamiento: la descripción es muy sencilla en tal caso, si los fragmentos no vuelan por el aire (la gravedad no actuará, pues fue neutralizada por la superficie horizontal): la *normal* equilibra al *peso*. En el caso más general, el que suele presentarse casi siempre, la tierra atrae a la granada inicial y a los fragmentos finales, pero eso no importa: los fragmentos caerán en tal forma que el denominado *centro de masa* (C.M.) caiga donde habría caído la granada completa (el C.M. sigue describiendo su trayectoria parabólica). Lo mismo ocurre con tres, mil o un millón de fragmentos. Así que puede aplicarle la receta a cada una de las partes en que decida dividir el Universo.

Hay algo más interesante: si se lograra aislar la granada del campo gravitacional de la Tierra, el principio de inercia dice que mantendrá su movimiento. Eso está expresado en la ecuación $\Delta \boldsymbol{p}_1 + \Delta \boldsymbol{p}_2 = \boldsymbol{0}$. Antes de la explosión habría un solo cuerpo que para mayor facilidad puede suponer en reposo (consecuencia del principio de inercia). En tal caso, se dice que se está haciendo la observación en el C.M. o sistema del centro de masa. Al final, habrá dos partes moviéndose en direcciones opuestas, cada una de ellas con la misma cantidad de movimiento en magnitud, con respecto al C.M. El C.M. de los dos fragmentos seguirá en reposo, satisfaciendo el principio de inercia.

Al igual que con la expresión general de Boltzmann, el resultado final de la discusión que acabamos de hacer, la conservación de la cantidad de movimiento, vale también en el universo cuántico; y vale, por supuesto, en la teoría de relatividad, especial o general. Otro tanto puede decirse para la energía. La conservación de la cantidad de movimiento, lineal y angular, y de la energía para un *sistema aislado* es (son) el (los) dogma(s) central(es) de la física, no solamente de la mecánica. Cuando se considera un sistema más complicado que un *sistema mecánico*, incluyendo los campos electromagnéticos, como se hará en la siguiente sección, o de cualquier otro tipo, los principios de conservación siguen en pié. Por eso podemos afirmar, ufanos, que *la física es una ciencia de principios*. Pero en el universo cuántico hay otro principio: en general, no se puede *observar* sin *perturbar* (aunque se puede manipular sin perturbar). Y el *observador* agrega (o quita) una porción a la cantidad que está observando (llámese momentum, energía, espín…). Ponga atención a lo siguiente: el observador generalmente *no tiene conciencia*. Un imán, por ejemplo, o un microscopio (ente clásico) por el que se hace pasar un fotón (ente cuántico) que luego interactúa con el sistema cuántico bajo estudio, es un aparato. El problema de la *medida* en *mecánica cuántica* es uno de los más sutiles, y aspiramos a discutirlo ampliamente durante la cátedra.

Un sistema más complicado, a la vez más realista, es un sistema de cargas y corrientes interactuando a través de los campos eléctrico y magnético, campo electromagnético, que ellas mismas modifican. Si pensáramos en dos partículas elementales interactuando electromagnéticamente, el universo completo serían las dos partículas y los campos que ellas mismas *producen*: diremos que la interacción consiste en enviarse fotones todo el tiempo. Pero no nos adelantemos a la gran síntesis, la *teoría cuántica de campos*.

2.8.2 Maxwell dijo: ¡hágase la luz!

El poeta inglés Alexander Pope escribió: "La Naturaleza y sus leyes yacían ocultas en la noche; Dios *dijo*: ¡*Hágase Newton*!, y todo fue *luz*". Maxwell *creó la luz* a partir de sus ecuaciones.

En esta subsección abordaremos la tarea de describir más o menos unificadamente los fenómenos electromagnéticos y mencionar, de paso, que la teoría clásica sobre la luz, la óptica física, es una parte del electromagnetismo. La descomunal obra de Maxwell está resumida en las 4 ecuaciones que llevan su nombre.

Al igual que la química, la termodinámica surgió primero como una ciencia empírica. Después de la mecánica, el siguiente gran capítulo formal de la física, pieza magistral de la ciencia

matemático-experimental, es la electrodinámica. Los fenómenos electromagnéticos son más difíciles de describir en pocas palabras y en términos sencillos que los puramente mecánicos. En últimas sus ingredientes masivos, para no llamarlos materiales, son las partículas cargadas eléctricamente; en movimiento, tales partículas dan lugar a corrientes eléctricas. Las cargas, por sí solas, dan lugar a campos eléctricos; en movimiento, generan también campos magnéticos. Los ingredientes no masivos, no por eso inmateriales, son los campos eléctrico y magnético. Lo más grandioso de la noción de campo es esto: ¡un campo magnético cambiante en el tiempo genera un campo eléctrico; un campo eléctrico cambiante en el tiempo genera uno magnético! Pero los campos generados son también cambiantes, por lo que el proceso de autogeneración continúa indefinidamente... y se propaga en el espacio: eso son las **ondas electromagnéticas**.

La idea de describir la interacción entre cargas y corrientes en términos de líneas de campo (*de fuerza*, las denominó) es de Faraday. Esa idea fue muy afortunada; en definitiva, rebasó ampliamente la fenomenología que en su tiempo abarcaban estos fenómenos. Lo que empezó siendo una descripción gráfica de las fuerzas entre cargas y corrientes, un artificio matemático, se volvió un ente material, el campo electromagnético, con energía y momentum, tanto lineal como angular. Veamos.

En principio, la importancia de los campos radica en la posibilidad de describir matemáticamente la fuerza que experimenta un objeto que posee carga q y tiene masa m, por ende describir su trayectoria recurriendo a la segunda ley de Newton $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$; la expresión correspondiente se denomina fuerza de Lorentz:

$$\boldsymbol{F} = q\,(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}).$$

En palabras, una carga (supuestamente *puntual*) que se mueve con velocidad $\boldsymbol{v}$ experimenta una fuerza total que es la suma de dos términos: uno que depende solo del campo eléctrico, otro que depende del campo magnético pero también del vector velocidad, en la forma que establece el denominado *producto vectorial*. Resulta así fácil visualizar una descripción, en términos de *campos*, de la fuerza que una carga puntual puede hacer sobre otra colocada a cierta distancia y de la fuerza que un pequeño imán o un circuito de corriente puede hacer sobre otro imán u otro circuito diminuto cercano, o simplemente sobre una carga en movimiento; en el primer caso, se hablará de un campo eléctrico; en el segundo, de un campo magnético.

El lector ya está acostumbrado a la descripción de interacciones en términos de campo: basta con que regrese a la figura 2.1. Allí se ilustra el campo gravitacional producido por la Tierra. Podríamos escribir: $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{g}$ (muy similar en su forma a $q\boldsymbol{E}$). Pero debe tener cuidado: la magnitud de $\boldsymbol{g}$, escribámosla $|\boldsymbol{g}|$ o simplemente g, ya no es constante. Rigurosamente estaría dada por la relación: $g = GM/r^2$, siendo para el caso M la masa de la Tierra y r la distancia del objeto de masa m al centro de la Tierra, o mejor, la distancia entre los centros de masa de los dos objetos que interactúan gravitacionalmente, a condición de que los dos sean de forma esférica.

Los campos fueron tomando una realidad física a medida que el concepto se aprovechó para avanzar más. El paso decisivo lo dio Einstein y está bosquejado en el *manual* que escribiera con Infeld. Para los lectores menos experimentados en este tema, se hace aquí una breve descripción

gráfica de los campos en circunstancias muy sencillas, pero se les recomienda bajar de de alguna página (hay varias) el *manual* de Einstein e Infeld y *degustarlo* en su capítulo tercero: *Campo y relatividad*.

El campo eléctrico de una carga puntual se representa por una serie de líneas que emergen del punto donde se asume que ella está colocada, supuestamente en reposo: las líneas cruzarán isotrópicamente (distribuidas uniformemente en todas direcciones) la superficie de cualquier esfera imaginaria con centro en donde está la carga; estarán dirigidas hacia afuera si la carga es positiva, hacia dentro en caso contrario.

El campo eléctrico del sistema físico conformado por dos cargas iguales y opuestas separadas por una pequeña distancia es el siguiente paso. Una realización de ese sistema se da en muchas moléculas, las denominadas *polares*, entre ellas la de H_2O. D*ipolo eléctrico* es precisamente el nombre para este sistema. Una corriente a través de un anillo o espira circular da lugar al sistema físico conocido como *dipolo magnético*. Los dos campos se ilustran en la figura 2.22, en donde se muestran además algunas líneas de campo, eléctrico en el primer caso, magnético para el segundo. Nótese la semejanza (y la diferencia) entre los dos dipolos: el primero, un dipolo eléctrico; el segundo, uno magnético.

Una carga eléctrica neta se denomina técnicamente *monopolo* eléctrico. No existe *monopolo magnético*, o mejor, no ha podido determinarse su existencia. Históricamente, el estudio del campo magnético se hizo con imanes, lo que oscureció el concepto mismo, particularmente con la introducción de *polos* magnéticos.

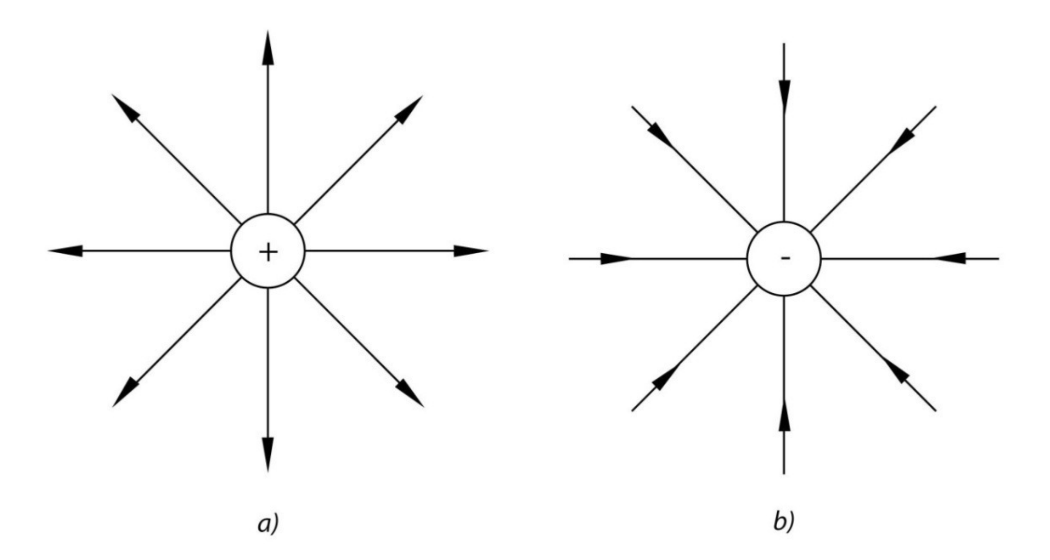


Figura 2.21. Campos eléctricos de cargas puntuales: a) positiva; b) negativa.

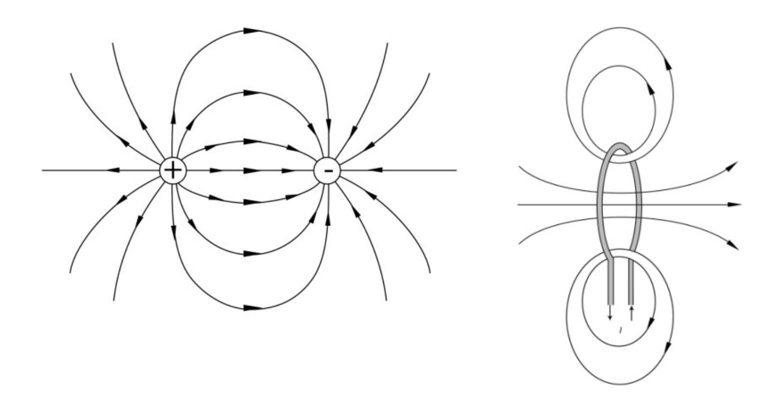


Figura 2.22. Dipolos a) eléctrico y b) magnético.

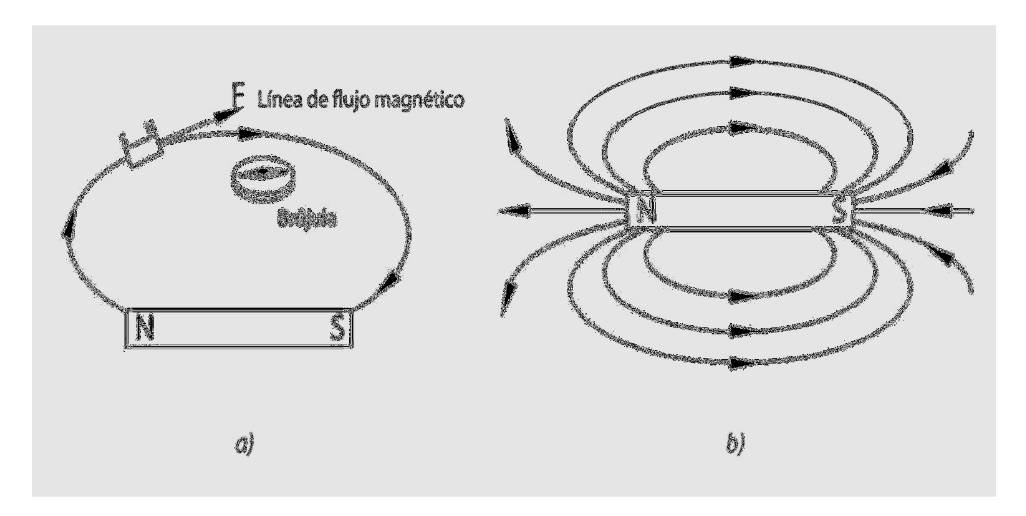


Figura 2.23. Campo magnético producido por un imán. La aguja o brújula se orienta en la dirección de las líneas de campo.

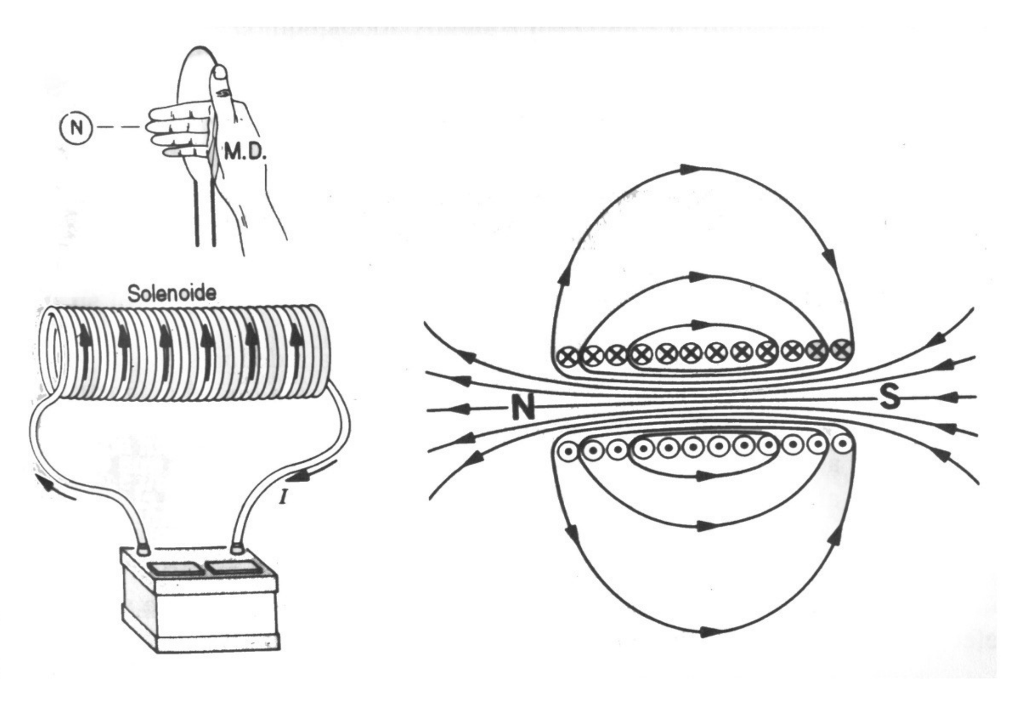


Figura 2.24. Un solenoide por el que se hace circular una corriente estacionaria (constante, denominada también *corriente directa*, c.d.) por medio de una pila o batería o cualquier otro tipo de fuente de c.d. A la derecha se ilustran las líneas de campo, resultado de la superposición de varias espiras como la de la figura 2.22b.

Aunque la situación es realmente más compleja, un imán produce un campo magnético similar al de un conjunto de espiras circulares, como se ilustra en las figuras 2.24; basta que compare con la figura 2.23b. En la figura de la izquierda se ilustra el efecto del campo resultante sobre un imán diminuto; la figura sugiere la orientación del pequeño imán (imagíneselo a nivel atómico, una molécula de magnetita, si lo prefiere), el cual de paso puede utilizarse para detectar el campo magnético.

Se suele introducir el término *momento de dipolo*, eléctrico o magnético según el caso, para caracterizar una propiedad intrínseca del dipolo mismo. A nivel atómico, el dipolo eléctrico se visualiza como una deformación del átomo o molécula en la cual el núcleo no está en el centro de la nube electrónica. Una imagen sencilla del dipolo magnético del átomo la suministra el modelo de Bohr: el electrón orbitando alrededor del núcleo produce una corriente eléctrica, el cual produce un campo magnético similar al de la espira de la figura 2.22b. Pero se puede reemplazar el electrón por una esfera macroscópica pequeña girando en círculo: regresamos, pues, de lo *micro* a lo *macro*, en contravía de la historia. La materialización de este último sistema la logró Rowland a fines del siglo XIX, a partir de los experimentos de Oersted; de ahí se obtuvo un resultado de gran importancia, al que volveremos en la siguiente sección.

El momento de dipolo magnético, o *momento magnético*, por brevedad, es más importante, porque es proporcional al *momento angular*. Hablando de cargas y agujas magnéticas, los casos descritos en las cuatro situaciones anteriores son los sistemas más sencillos que cabe imaginar. Los *polos* vienen en parejas complementarias. Pero no se olvide que no hay *monopolo magnético*;

el polo norte y el polo sur resultaron ser una ficción: lo que hay es una circulación de corriente, como se muestra en la figura 2.22b.

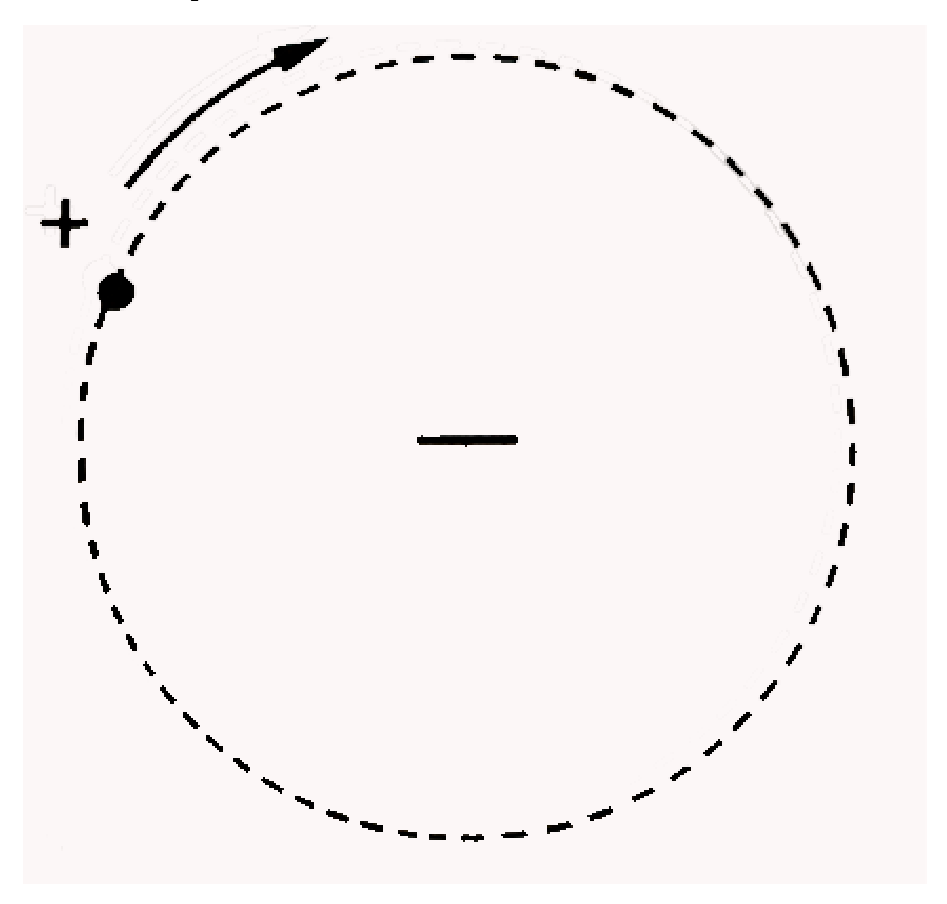


Figura 2.25 Experimento de Rowland. Una carga eléctrica girando en círculo produce un campo magnético. El campo magnético es similar al de la espira, pero rigurosamente hablando es un campo dependiente del tiempo. O mejor, para adelantarnos a la discusión de la sección 4.9, la carga se ve como un campo eléctrico variando en el tiempo que a su vez genera un campo magnético. Ese campo magnético se manifiesta desviando la aguja o brújula colocada en el centro.

No está de más representar dos casos igualmente sencillos, cuando las cargas son del mismo signo y cuando los imanes están enfrentados por polos opuestos o de la misma denominación, lo que se indica en la figura 2.26.

Otro caso sencillo lo constituyen líneas rectas muy extensas de carga y de corriente, alambres infinitos, para simplificar aún más, vale decir, cuando la longitud de los segmentos rectos considerados es muy grande comparada con la distancia a la cual se quiere examinar el campo. Para visualizarlos más fácilmente, considérense solo las secciones transversales de esos segmentos o líneas; es como si se estuvieran observando *puntos*, siempre y cuando el grosor de los segmentos sea suficientemente delgado. De nuevo las líneas del campo eléctrico del alambre cargado positivamente divergen en dirección perpendicular a la línea (ya no se trata de un punto); en cambio las del campo magnético del alambre de corriente en dirección hacia el lector son circulares, se cierran sobre sí mismas. Esto se ilustra en la figura 2.27. Si se observan con atención,

se verá que las del imán también se cierran sobre sí mismas (la que va sobre el eje se cerrará en el infinito).

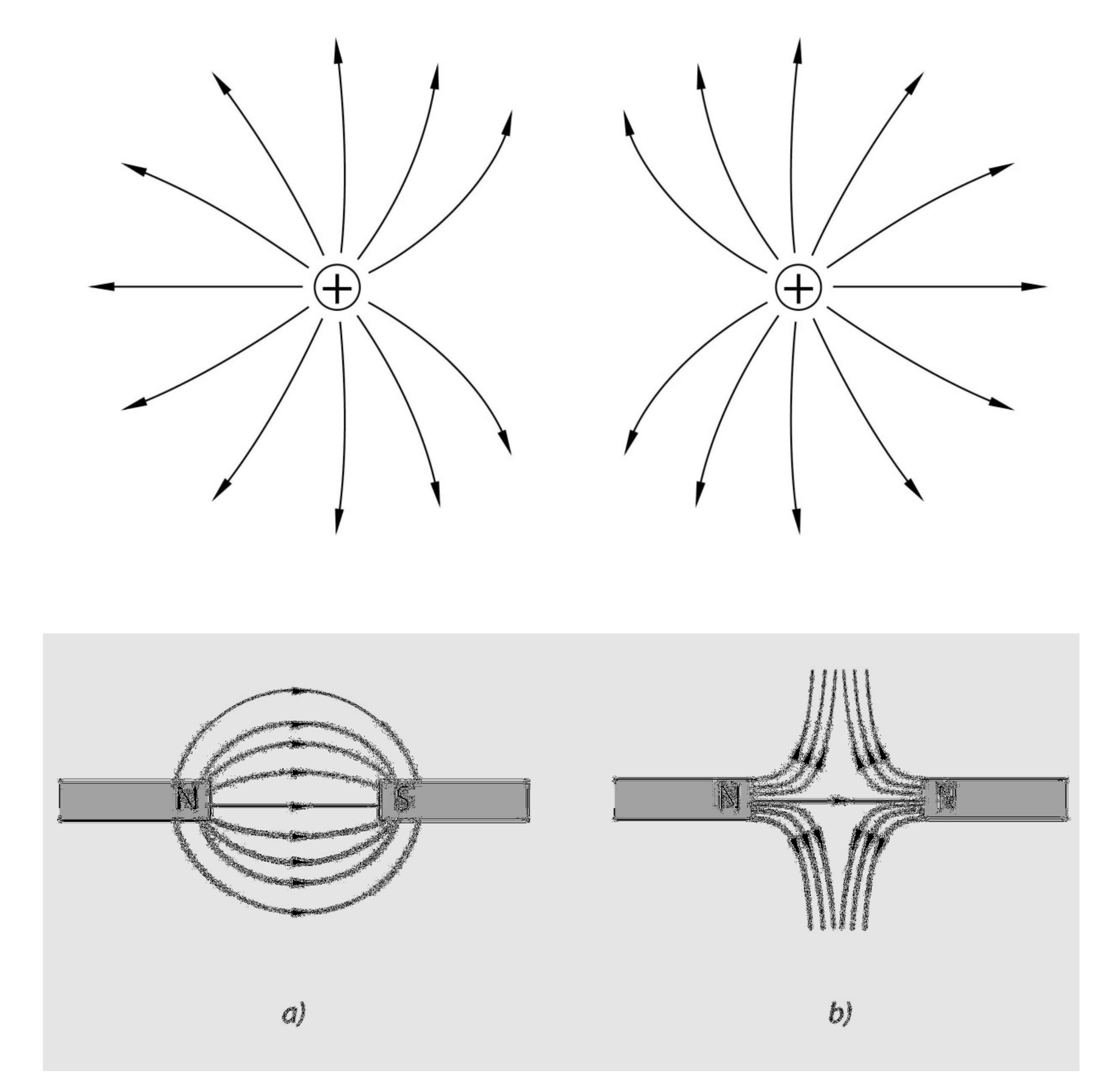


Figura 2.26. a) Campo eléctrico de dos cargas del mismo signo; b) campos magnéticos cuando dos imanes se acercan, con diferente o la misma *polaridad*, término ambiguo que dio lugar a equívocos.

Quizá el lector haya oído hablar de condensadores cilíndricos y de cables coaxiales. En uno y otro se *encierra* el campo (eléctrico o magnético, respectivamente) entre dos cilindros concéntricos. Las líneas de campo siguen la misma orientación que tienen en la figura 2.27.

Por analogía con los fluidos, las *líneas de campo* dan lugar a un flujo a través de una sección superficial. En ocasiones, es conveniente pensar en el flujo a través de una superficie cerrada. A diferencia de los *flujos* de campo, en los fluidos mecánicos (líquidos o gases) esta situación no es tan interesante, porque el flujo hacia dentro es invariablemente el mismo que el flujo hacia fuera: las líneas de flujo son en principio cerradas. En el caso del campo eléctrico, en cambio, éste puede

dar lugar a un flujo neto (es el caso usual cuando hay una carga dentro), lo que no ocurrirá con el campo magnético, precisamente porque sus líneas de campo son cerradas.

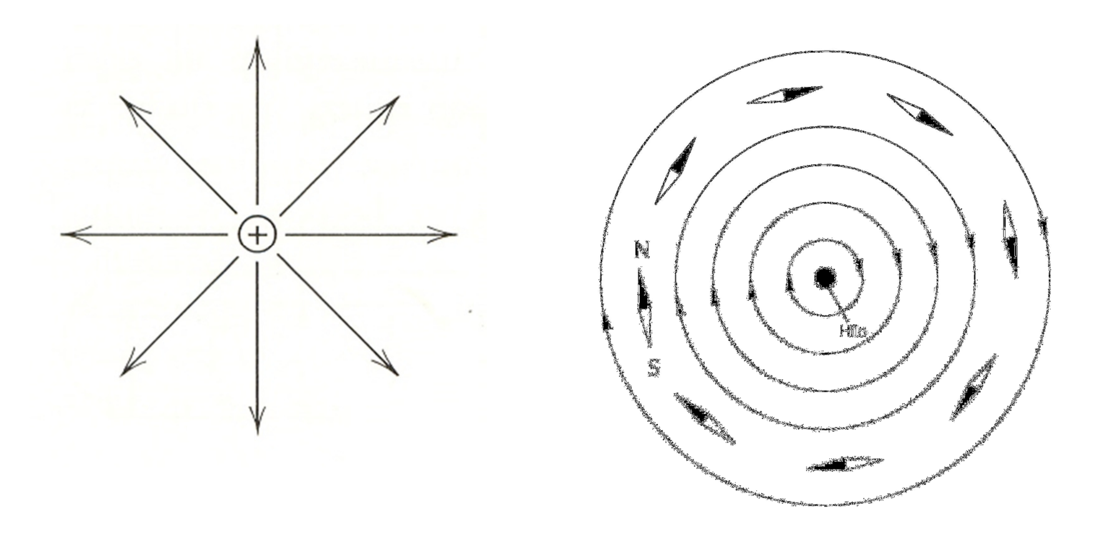


Figura 2.27. Sección transversal de los campos de líneas de carga y de corriente. a) Campo eléctrico de una línea recta cargada; b) campo magnético de una línea de corriente, segmento recto muy extenso, en dirección entrante a la hoja.

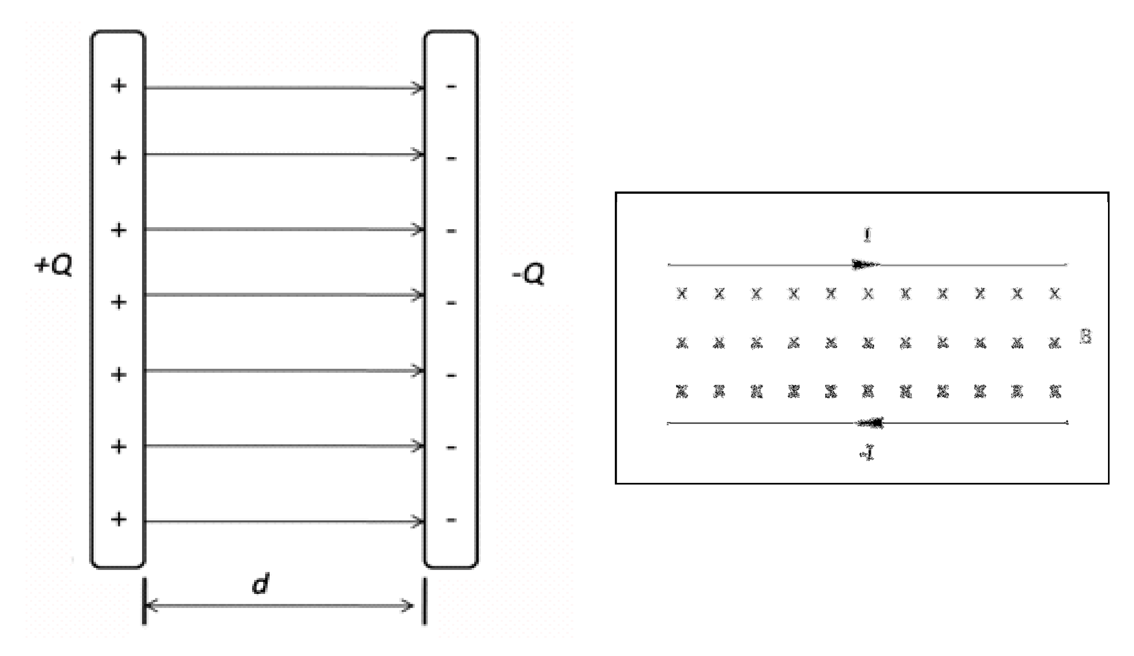


Figura 2.28. Campos producidos por placas paralelas ilimitadas. Se muestra solo una región de las placas. a) Campo de placas cargadas con cargas iguales y opuestas. b) Campo magnético producido por un par de placas que transportan corriente en direcciones opuestas.

Por último, considérense dos placas paralelas muy extensas (representadas por planos paralelos), y visualícese un corte transversal. Discutiremos brevemente dos situaciones interesantes en que pueden producirse campos eléctrico o magnético muy aproximadamente uniformes. En el primer caso, se trata de placas cargadas, la de la derecha con carga positiva, la de la izquierda con carga negativa: es lo que suele denominarse un *condensador* de placas planas, un dispositivo muy usual en diversos *acumuladores* y en múltiples circuitos eléctricos o electrónicos. El segundo caso es menos realista o frecuente y representa igualmente dos láminas muy extensas que llevan corriente, la inferior en la dirección que se aleja del lector y la superior acercándose hacia él. A diferencia de las líneas de campo eléctrico, que empiezan y terminan en las placas, las de campo magnético *se cierran sobre sí mismas en el infinito*, para el caso ideal considerado, por fuera de las placas en el caso real de placas finitas. Las líneas de campo se ilustran en la figura 2.28. En ambos casos, debería tenerse en cuenta la deformación que tiene lugar en los extremos de las placas, para satisfacer propiedades de los campos que no discutiremos en esta breve síntesis.

Hasta aquí se han hecho suposiciones muy fuertes, no solamente en cuanto a la geometría de los objetos: se ha supuesto, por ejemplo, que las cargas o las corrientes han estado ahí desde siempre. En un caso práctico, de la vida diaria, la fuente de carga sobre las placas del condensador podría ser una fuente de voltaje alterno; lo mismo puede pensarse con la de campo magnético en el lado derecho: corriente alterna que durante medio ciclo va hacia la derecha por la placa inferior, hacia la izquierda en la superior, para luego hacerlo a la inversa.

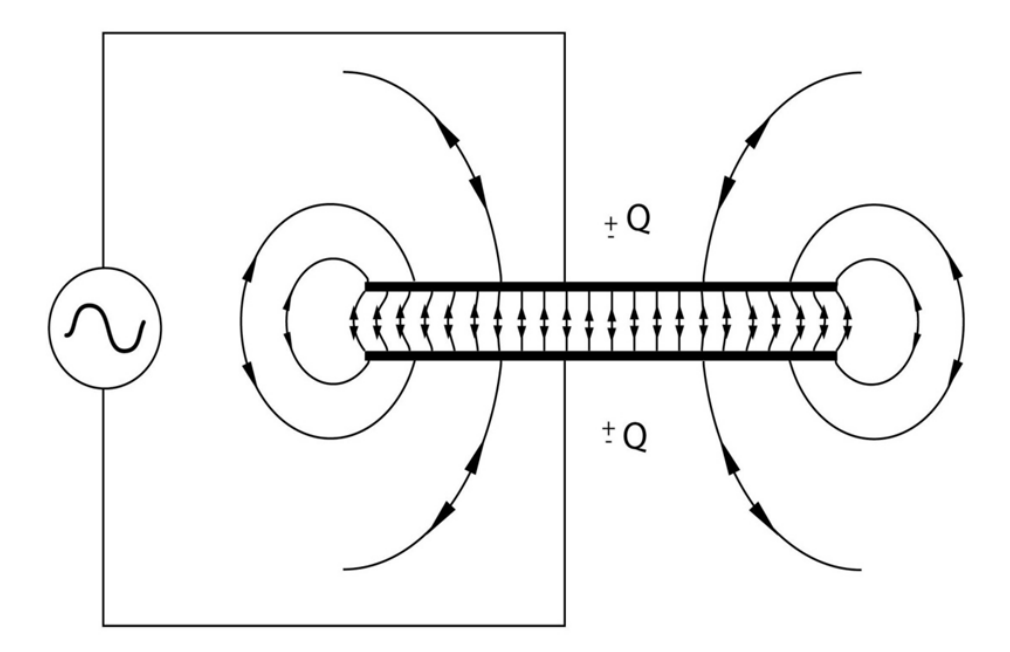


Figura 2.29. Una fuente de corriente alterna produce entre las placas paralelas un campo *oscilante*. Ese campo eléctrico variando en el tiempo, al igual que ocurre en el experimento de Rowland, produce un campo magnético. No se ilustran las líneas de campo magnético, pero se puede entender fácilmente que ellas son líneas circulares, siempre perpendiculares al campo eléctrico, con centro en el centro de simetría de la figura, similares a las de la corriente de un alambre muy largo, como el de la figura 2.27b. Obsérvese

que alrededor de los segmentos rectos que llevan la carga (corriente) de la fuente a las placas hay también líneas de campo cerradas, aproximadamente circulares cerca de cada segmento.

El resultado para el primer caso se esquematiza en la figura 2.29; no hemos dibujado las líneas de campo magnético inducido: ellas son líneas circulares, siempre perpendiculares al campo eléctrico, con centro en el centro de simetría de la figura, similares a las de la corriente de un alambre muy largo, como el de la figura 2.27b. De hecho, es como si la corriente hubiera continuado dentro del condensador en la dirección de las líneas de campo eléctrico, en sentido positivo si el campo eléctrico está aumentando, en sentido opuesto si está disminuyendo con el transcurso del tiempo. Para el segundo caso (placas que llevan corriente, alternando su sentido), surge un campo eléctrico inducido cuyas líneas de campo son nuevamente perpendiculares, esta vez a las líneas del campo magnético que está oscilando en el tiempo. Debe quedar claro que esos campos inducidos no tienen origen en cargas o corrientes eléctricas: su origen es la variación en el tiempo de su contraparte, eléctrica o magnética. A esos campos inducidos, no producidos por cargas o por corrientes eléctricas, volveremos en breve.

La historia de la electricidad y el magnetismo es muy rica e ilustrativa. No nos detendremos en ella, por estar fuera del propósito de estas notas. Pero vale la pena rescatar los fenómenos fundamentales que encierra y que pasaron desapercibidos durante muchos siglos. Uno de ellos es el resultado del experimento de Rowland ya mencionado. Nos limitaremos a destacar el hecho subrayado por Einstein e Infeld, a saber: del movimiento en trayectoria circular de la carga surge un campo eléctrico variable en el tiempo que produce un campo magnético. Pero lo contrario también ocurre: si se dispone de un campo magnético variable en el tiempo, seguramente debe surgir un campo eléctrico. Históricamente las cosas ocurrieron a la inversa: Faraday descubrió la ley que lleva su nombre, según la cual un imán o cualquier otra fuente de campo magnético en movimiento puede generar, bajo condiciones adecuadas, una corriente eléctrica, por ende, un campo eléctrico, responsable este último de la corriente generada. El experimento más elemental seguramente es conocido por el lector: al acercar un imán a un circuito como el que ilustra la figura 2.30, no alimentado por ninguna fuente o batería, surge una corriente en cierta dirección la cual se puede detectar mediante un galvanómetro; por el contrario, al alejar el imán, aparece una corriente en dirección contraria. Después de muchos experimentos similares, en los que Faraday acercaba el circuito al imán, utilizaba un solenoide como el de la figura 2.24, hacía variar la corriente que producía un campo magnético, etcétera, llegó a la conclusión que resume su más importante contribución al campo: cuando un campo magnético varía en el tiempo *de alguna manera*, da lugar a un campo eléctrico inducido.

La predicción exacta de la forma en que varían espacial y temporalmente los campos eléctrico y magnético en diversas geometrías bajo ciertas circunstancias y condiciones, su relación con las cargas y las corrientes que los producen, la generación de nuevas corrientes y por ende la nueva distribución de esas cargas dando lugar a nuevas formas de los campos, constituyen el gran triunfo de la electrodinámica, como se conoce la teoría que sintetiza la descripción de todos estos fenómenos electromagnéticos. Su enunciado son cuatro ecuaciones que llevan el nombre de Maxwell, quien con su gran ingenio logró tan brillante síntesis. Combinándolas, surge la

maravillosa predicción a que hemos hecho referencia: *los campos electromagnéticos se propagan en el vacío a una velocidad que es precisamente la velocidad de la luz*.

En palabras, se puede dar una somera idea de las consecuencias de aquella síntesis, ejemplificada en lo que hemos dicho e ilustrado desde la sección anterior: 1) una forma de generar campos eléctricos es mediante cargas; ellos obedecen a la ley del inverso del cuadrado de la distancia en la forma que indica la ley de Coulomb; las líneas de campo se originan en cargas positivas o parecen provenir del infinito; y se sumen en cargas negativas o parecen proseguir al infinito; 2) otra forma de generar campos eléctricos es mediante campos magnéticos que varían en el tiempo, bien sea moviendo imanes o mediante corrientes alternas; las líneas de campo eléctrico así generadas son cerradas, lo que puede dar lugar a *corrientes inducidas*, si se colocan conductores allí donde surgen esos campos; 3) a su vez, los campos magnéticos son producidos, en primera instancia, por corrientes, es decir, cargas en movimiento; las líneas de campo magnético son siempre cerradas; 4) pero al igual que los campos eléctricos *inducidos* mediante campos magnéticos que varían en el tiempo, los campos eléctricos que varían en el tiempo dan lugar a campos magnéticos *inducidos*.

A diferencia de los campos eléctricos inducidos, dando lugar a las corrientes inducidas que a nivel experimental estudió tempranamente Faraday, los campos magnéticos inducidos por campos eléctricos variables en el tiempo fueron predichos por Maxwell teóricamente y luego verificados experimentalmente por él mismo y posteriormente por Rowland. Ése fue quizá el mayor mérito del primero; fue, de paso, lo que le condujo a la unificación del electromagnetismo y de la óptica, dos campos hasta entonces totalmente separados. Fue así como apareció por primera vez en la historia de la física una constante fundamental: la velocidad de la luz. Formado en la escuela newtoniana, Maxwell no tuvo más remedio que apelar a un medio físico ya previsto por otros, el *éter luminífero*, para dar cabida a su constante: sus ondas, incluida la luz visible, se moverían a velocidad c en ese tenue medio material; en cualquier otro sistema, por ejemplo la Tierra, la cual para entonces era bien sabido que se mueve alrededor del Sol, esas ondas se moverían con otra velocidad, resultado de la adición de velocidades de la mecánica galileana y newtoniana; las ondas de luz y la Tierra misma se moverían también en ese medio, el omnipresente éter. Las contradicciones no tardaron en presentarse, pero aquí no se hará más que una mención circunstancial a esos problemas, resultado del experimento negativo de Michelson y Morley.

Volvamos a los campos, campos en el vacío, para mayor facilidad. Cada vez que un campo eléctrico cambia produce un campo magnético igualmente variable, el cual a su vez va a generar un campo eléctrico cuya variación provocará un campo magnético y así sucesivamente: esa es la razón para que se produzcan las *ondas electromagnéticas*: campos entrelazados que se propagan, aún en el vacío, o mejor, sobre todo en el vacío, haciendo que nos llegue valiosa información del interior de las estrellas, del confín del Universo. En la materia, esos campos producen efectos sobre las cargas que hay en sus ingredientes fundamentales y se generan nuevos campos que se superponen con los iniciales.

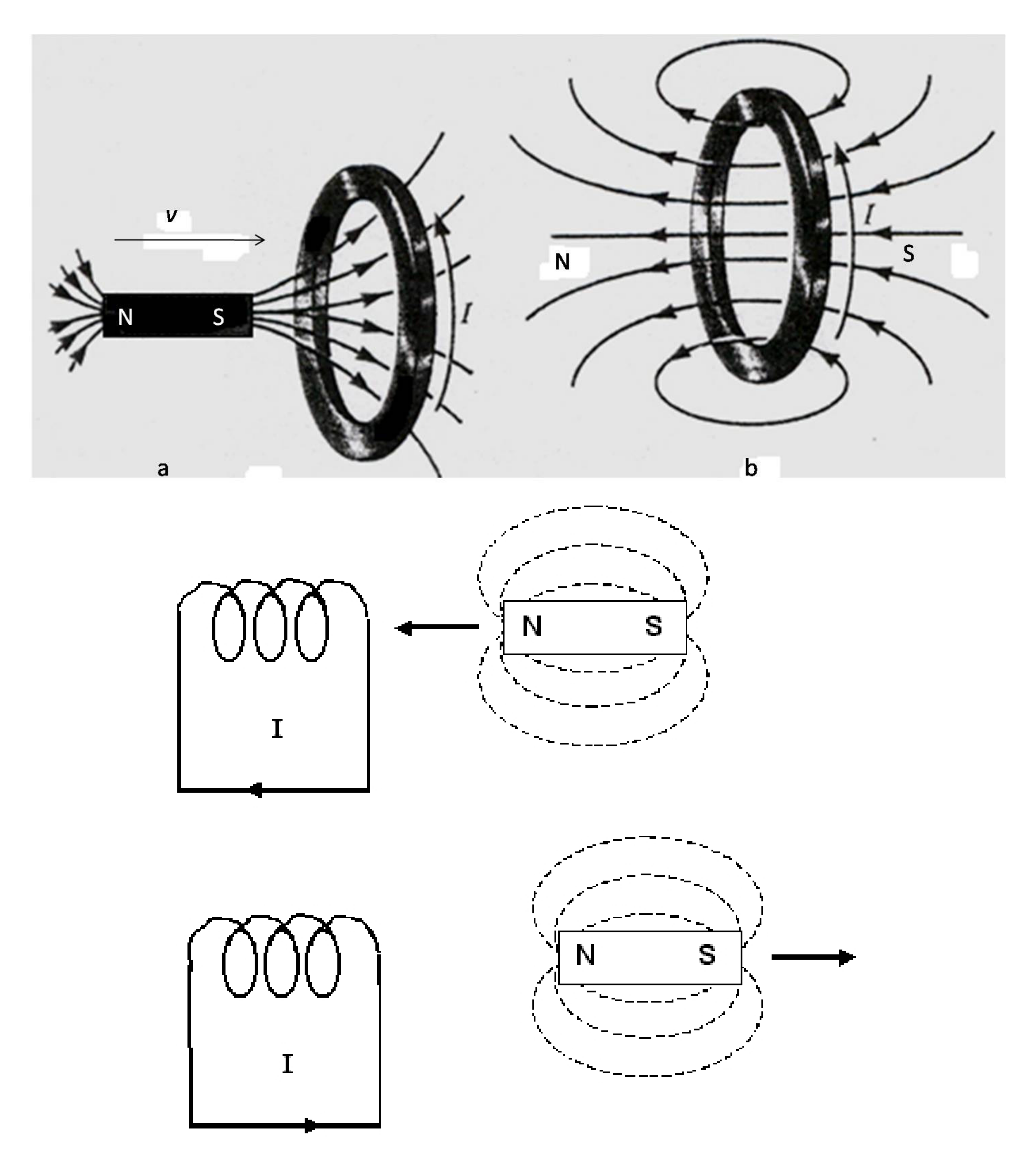


Figura 2.30 Inducción electromagnética. Al acercar un imán a un circuito (bobina) como el de la figura, se genera una corriente en cierta dirección; al alejarlo, la corriente va en dirección contraria: es una corriente inducida. Mientras no haya movimiento relativo entre el imán y la bobina, no habrá corriente inducida. (Imagen tomada de http://www.rena.edu.ve/TerceraEtapa/Fisica/CorrientesInducidas.html) La imagen inferior muestra con mayor detalle lo que se suele hacer en la práctica, utilizando un solenoide.

Los campos resultantes satisfacen las ecuaciones de Maxwell, cuya elegante formulación matemática el lector puede consultar en los textos (hemos hecho alusión a una sencilla presentación de Sagan) y de cuya aplicación cotidiana está inundado el mundo de las comunicaciones.

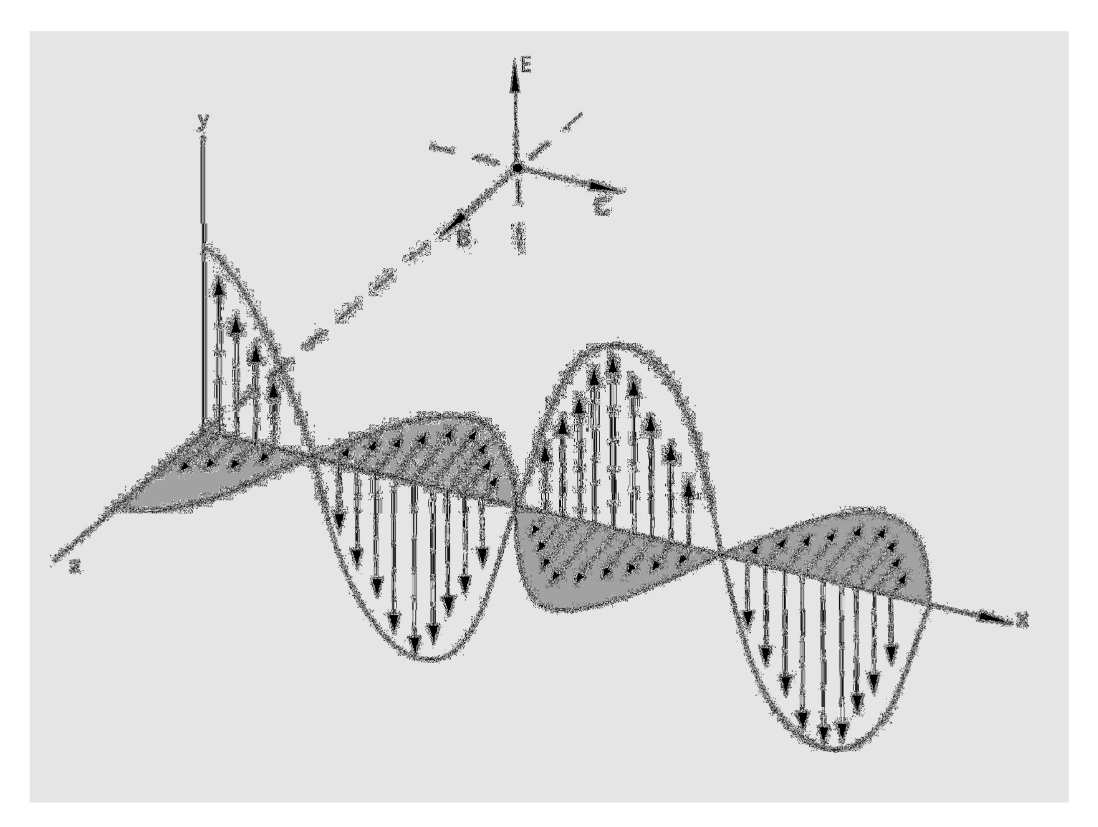


Figura 2.31. Propagación de una onda electromagnética plana. Obsérvese que los tres vectores, a saber, **E**, **B** y **c**, son perpendiculares entre sí. Se dice que esta onda tiene polarización lineal en dirección *y*.

No valdría la pena el esfuerzo anterior hacia la visualización de los campos electromagnéticos para lo que nos incumbe, el mundo microscópico, si no tuviéramos en cuenta la producción de esos campos en el interior mismo de la materia, en los átomos y, por qué no, en los núcleos. Ilustrémoslo con un ejemplo dinámico de singular trascendencia para el *universo cuántico*. Surgirán de paso nuevas contradicciones del enfoque mecanicista de la física.

Recuérdese que un movimiento circular, en un plano XY, puede verse como la suma o superposición de dos movimientos oscilatorios, uno en dirección *x*, el otro en dirección *y*. En la imagen clásica del átomo más sencillo, el de hidrógeno, el electrón estaría revoloteando alrededor del protón, en un movimiento circular. Visto de canto, desde el eje Y o desde el eje X, es como si el electrón estuviera oscilando, a lo largo de X o de Y respectivamente, con una amplitud A igual al radio de la supuesta órbita. En esas condiciones, se tiene un dipolo eléctrico que oscila, dando lugar así a ondas electromagnéticas.

Si los físicos hubieran adivinado más temprano que las corrientes son corpúsculos en movimiento cargados eléctricamente (cargas elementales) y que el magnetismo es producido por el movimiento de esas cargas, habrían podido dar un soporte fundamental a la hipótesis atómica. Fue el haber pasado por alto esta hipótesis lo que hizo que llegaran la mayoría de los físicos más prominentes del siglo XIX a los albores del siglo XX menospreciando la hipótesis atómica. Seguramente esta reflexión sirva para elevar aún más la imagen del joven Einstein. De sus cinco históricas contribuciones, publicadas todas ellas, a excepción de su tesis doctoral, en 1905, la que

llamó más la atención inicialmente fue la que se refiere al tamaño de los átomos y a su movimiento browniano. Pero volvamos a una imagen más reciente, a saber, la del electrón *circulando* como se ilustra en la figura.

En términos clásicos, se diría que el electrón está *radiando*, generando campos que se propagan, lo cual significa que estaría perdiendo energía. En condiciones *estacionarias* el electrón no radía, lo que llevó a descartar el modelo de Rutherford. Que eso no sea lo que se observe significa, de paso, el colapso del edificio clásico: los electrones no pueden estar siempre radiando si no tienen una fuente que los esté alimentando permanentemente. Ese fue el derrumbe de la pieza más monumental de la teoría clásica, al tenerse que concluir que la radiación atómica ocurre de otra manera, no predicha por el electromagnetismo de Maxwell. A pesar de lo anterior, una antena es la materialización de la oscilación dipolar, componente a lo largo del eje X o del eje Y que acabamos de describir; para ese caso, las leyes de la electrodinámica funcionan inequívocamente. Es así como se generaron ondas electromagnéticas para la comunicación desde finales del siglo XIX, el mismo tipo de ondas en esencia que nos llega de los átomos que constituyen la materia estelar.

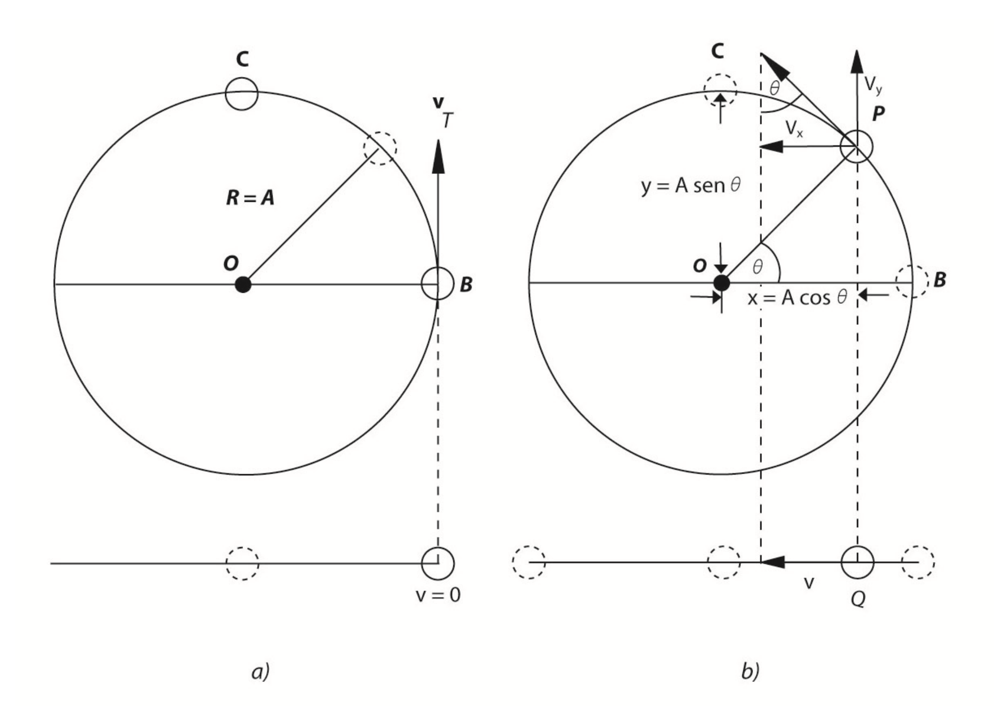


Figura 2.30. Un punto de partida de toda teoría clásica. Una carga girando en círculo produce ondas electromagnéticas. Estas ondas pueden visualizarse como el resultado de osciladores cruzados (vertical y horizontal).

Es suficiente por ahora con lo que acabamos de hacer para adentrarnos en la descripción del rango de fenómenos que puede describir la teoría de la casilla inferior derecha. Faltaría agregar algunas nociones elementales adicionales sobre el comportamiento de las ondas clásicas, a las que ya nos hemos referido en la sección 6. Lo haremos cuando sea necesario.

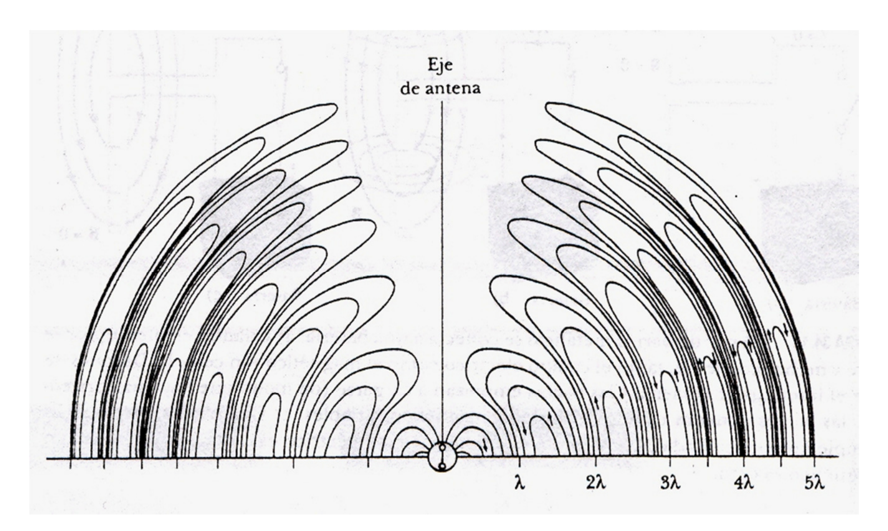


Figura 2.31 Campo variable de un dipolo eléctrico. A grandes distancias, las ondas electromagnéticas forman ondas planas, como sugiere la figura 2.16. (Tomado de Panofsky y Phillips: *Classical Electricity and Magnetism,*Addisson Wesley 1958.)

Se hace necesario entonces introducir un lenguaje que nos permita precisar de la mejor manera lo que se quiere medir o determinar. Por ejemplo, cuando nos referimos al todo hay que hacer distinciones como éstas, para no caer en contradicciones: el Universo Causal es el trozo de universo al que tenemos acceso a través de observaciones; no se puede hablar de separabilidad, en el sentido exigido por Einstein, en los sistemas cuánticos correlacionados (volveremos a este asunto más adelante). A propósito de Universo, surge la siguiente pregunta todavía sin respuesta: cuando se trata de *hacer observaciones* sobre el 'Universo' como un todo, ¿quién es el observador? A ese tipo de preguntas habrá que volver en el curso de la cátedra y a lo mejor podamos referirnos en un próximo ensayo.

Discutamos el penúltimo asunto, el de la separabilidad o no entre las partes de un sistema compuesto. En la tradición griega y en la metódica ciencia iniciada con Bacon y Galileo se ha supuesto que para entender el comportamiento de un objeto compuesto, éste se puede dividir en partes y analizar por separado cada una de ellas. Está implícita la hipótesis de que cada una de las partes tiene realidad física *en sí misma*. Nadie la habría puesto en duda, de no ser por las implicaciones de la nueva física. La exigencia explícita de respetar esa realidad está contenida en una famosa publicación de Einstein, Podolsky y Rosen de 1935. Pues bien, el problema se trasladó de la filosofía a la física experimental con las también famosas *desigualdades de Bell*: todos los experimentos realizados desde 1982 (Aspect, 1982; volveremos a ello más adelante) muestran el carácter observable y medible de las correlaciones cuánticas, capaces de tomar valores más grandes que los límites exigidos por *una descripción realista separable de tipo clásico*; aquellos han confirmado los valores predichos cuánticamente, valores clásicamente prohibidos.

2.9 Dos experimentos clásicos cruciales

En el siguiente capítulo describiremos algunos experimentos cruciales que ponen de manifiesto el extraño comportamiento de la materia en el mundo microscópico, dando lugar a las propiedades que encontramos en la materia toda. Estas últimas las podemos visualizar clásicamente en

ocasiones, en forma empírica. En otras, es la manifestación del comportamiento colectivo coherente que exige una descripción cuántica.

Dos experimentos clásicos realizados en un período de 10 años, el primero en 1897, el segundo en 1908, envolvieron partículas subatómicas, electrones e iones. El primero condujo al descubrimiento del electrón, el segundo a la determinación de su carga.

Empezaremos con el histórico experimento de 1897, precedido de algunas anotaciones históricas, el cual puso en evidencia que *el fluido eléctrico* no es un fluido en el sentido clásico anterior al *novecientos*. No obstante, si las *ondas de materia* pueden *imaginarse* como un *continuum*, hasta cierto punto la imagen de *fluido* podría seguírsele asignando a los electrones. La *nube electrónica* es, desde cierta perspectiva, una reminiscencia de aquellos tiempos. Para concluir el capítulo, haremos una breve descripción del experimento de Millikan, el cual permitió establecer con bastante precisión la carga del electrón. Esta sección puede dejarse de lado, si el lector quiere ya pasar a los experimentos que establecieron las extrañas características ya anunciadas de los primeros *entes cuánticos* descubiertos, el electrón y el fotón, y a una nueva formulación de las leyes de la física.

2.9.1 Descubrimiento del electrón

A finales del siglo XIX tuvo lugar una gran controversia sobre la naturaleza de las descargas eléctricas en gases rarificados, en particular sobre las que los experimentalistas dieron en llamar *rayos catódicos*. Interesantes *per se*, su estudio llevó a J.J. Thomson, Thomson padre, a un problema más básico: la naturaleza de la electricidad. El resultado fue triplemente gratificante, porque: 1) puso de relieve la divisibilidad del átomo; 2) llevó al descubrimiento de la primera partícula elemental que se conoce, la única que ha permanecido estable por más de cien años y la más liviana de todas, a excepción del neutrino; 3) dilucidó el carácter de la electricidad, finalmente corpuscular o granular, de acuerdo con los resultados del experimento de Thomson, al contrario de todas las concepciones precedentes que la imaginaron como un *continuum*.[16]

El *rayo*, fenómeno complejo que sirvió de punto de partida para lo que sigue, lo concibieron o imaginaron destacados científicos a fines del siglo XIX como una forma de radiación producida por las vibraciones del *éter*, en cuyo caso sería similar en su naturaleza y origen a las ondas de luz y a las recién descubiertas ondas de radio; en otro esquema de la época se supuso que podría ser un haz de partículas diminutas. La mayoría de los físicos alemanes se inclinaban por lo primero, mientras que sus colegas franceses y británicos favorecían la segunda opinión. Un factor adicional de confusión lo introdujeron los rayos X, descubiertos por Wilhelm Röntgen, quien por ese descubrimiento recibiera el primer premio Nobel en Física en 1901. La historia de tales *rayos* se remonta a varios siglos atrás. Rigurosamente hablando, podría rastrearse su origen al de la

---

[16] Desde entonces y hasta hace unos cuarenta años se creía que la carga se presentaba siempre en múltiplos enteros de la carga del electrón. Desde que Gell-Mann propuso su modelo, se asume que algunas partículas elementales exhiben carga fraccionaria, 1/3 o 2/3 de la carga del electrón: éstas son los *quarks*, de los cuales hay seis tipos, o mejor, *tres colores en dos diferentes sabores*. Véase en *Unos cuantos para todos* el opúsculo: *Una breve mirada a la Física de Partículas*.

descarga eléctrica conocida precisamente por ese nombre desde muy antiguo y sistemáticamente estudiada por primera vez por Benjamín Franklin. Pero la naturaleza del rayo que se asocia con el trueno, una corriente de electricidad, había sido puesta en evidencia en experimentos realizados en 1752, sugeridos precisamente por el científico y político norteamericano. (Véase: *El Rayo*, H. Torres, Unibiblos, 2002.)

En 1709 Francis Hauksbee, conocido por sus observaciones sobre la repulsión eléctrica, reportó que cuando se extrae aire de una vasija de cristal hasta cuando la presión se reduce a 1/60 la presión del aire normal y se conecta la vasija con una fuente de *electricidad de fricción*, aparece una extraña luz en el interior del recipiente. Destellos similares fueron reportados y asociados al vacío parcial que se produce en la superficie superior de columnas de mercurio en los barómetros. En 1748 el médico naturalista William Watson describía la luz surgida en un tubo de 81 centímetros en el que se había provocado el vacío, como "un arco de llama lamiente". Michael Faraday habla también en sus notas de tales *rayos*. Pero al igual que sus contemporáneos no acertó a comprender la naturaleza de esa luz: era demasiado temprano para realizar los experimentos que la minuciosa *observación* (indirecta) de tan diminutas partículas requería.

La explicación hoy en día es muy sencilla: cuando una corriente eléctrica *fluye* a través de un gas, los electrones que forman parte de la corriente (un enjambre de electrones *libres*) golpean contra los electrones de los átomos presentes en el gas (electrones *ligados*) aumentando su energía, la que torna a desprenderse en forma de luz si las condiciones son favorables. La experiencia que realizaron Franck y Hertz en 1914, al que nos referiremos más ampliamente en el capítulo siguiente, lo confirman. Ese fue uno de los experimentos claves que ayudaron a establecer la teoría atómica moderna, pues muestra que los átomos absorben energía en pequeñas porciones o cuantos de energía, verificándose los postulados de Bohr con electrones como proyectiles. Las pantallas fluorescentes y las señales de neón se basan en el mismo principio y la coloración está determinada por la frecuencia de la luz (fotones) que más favorablemente emiten los átomos del gas (en realidad, los electrones ligados, al pasar de uno a otro *nivel de energía*).

Era necesario eliminar al máximo permitido por la tecnología de la época el gas residual, antes de poder detectar al responsable del efecto; era indispensable disponer de bombas de aire eficaces. En 1885 Johan Heinrich Geissler inventó una que reducía la presión a una diezmilésima de su valor a nivel del mar. Julius Plücker, catedrático de filosofía natural en la Universidad de Bonn, realizó las primeras observaciones bajo estas nuevas condiciones. Utilizando la terminología de Faraday, se denomina *ánodo* a la placa unida a la fuente de electricidad positiva y *cátodo* a la otra. Resumiendo las observaciones, diríase que algo salía del cátodo, viajaba a través del espacio casi vacío del tubo, golpeaba el cristal y era recogido por fin en el ánodo. Fue Eugen Goldstein quien bautizó esa extraña sustancia con el nombre de *rayos catódicos*.

Pero los *rayos catódicos* no eran rayos, no formaban parte de la luz, un efecto secundario. Ya Perrin, famoso entre otros aportes por la verificación que hizo de las predicciones de Einstein en torno a los átomos en 1908, desde 1895, en su tesis doctoral, había demostrado que los rayos depositaban carga eléctrica negativa en un colector de carga. Para entonces Thomson había entrado en escena, pero sus primeras determinaciones de la velocidad de las partículas estaban

erradas. El hábil experimentalista Hertz había descartado que las partículas estuvieran cargadas: los campos eléctricos que aplicó para desviarlas no eran suficientemente intensos, lo que le impidió culminar exitosamente el estudio emprendido; téngase presente además que el alemán estaba influenciado por la posición filosófica de Ernst Mach, su compatriota. Thomson, libre de ese lastre, aunque no muy hábil con sus manos, de acuerdo con el testimonio de sus auxiliares, sabía cómo planear el siguiente paso para poder avanzar; y lo hizo acertadamente.

El premio Nobel Steven Weinberg hizo de un curso básico ofrecido en Harvard hace 5 décadas un excelente libro: *Partículas subatómicas*. El más brillante y extenso capítulo se denomina precisamente *El descubrimiento del electrón*. Vale la pena consultarlo. Algunos datos interesantes aquí reproducidos fueron tomados de su libro. En todo caso, los aspectos centrales del experimento de Thomson, realizado para determinar la relación entre la masa y la carga de las partículas responsables de los rayos, pueden verse en cualquier texto de física y se resumen en una ecuación que sirve de paso para aplicar los conceptos de campo eléctrico y campo magnético, novedosos para quienes no tienen experiencia previa en cursos de física. No se discuten los detalles por brevedad y porque el tubo de rayos catódicos por él utilizado, del cual se ilustra un prototipo en la figura 2.32, forma parte de la anterior generación de televisores domésticos. Sinteticémoslo de esta manera: el electrón es previamente acelerado a través de una diferencia de potencial V negativa entre cátodo y ánodo, ganando así una energía cinética $½mv^2 = eV$. Al entrar con rapidez v en una región donde existe un campo eléctrico o un campo magnético (aproximadamente uniforme) es desviado de su trayectoria, horizontal para todos los efectos, en una pequeña distancia δ (δ_e o δ_b según el caso).*

Lo esencial del experimento de Thomson se resume en la expresión que obtuvo para la relación entre la masa y la carga del electrón, m/e, a partir de las desviaciones experimentadas por esa partícula indivisible (rigurosamente *a-tómica*) en campos eléctrico E y magnético B, desviaciones fácilmente evaluables a partir de la fuerza de Lorentz discutida en la sección 2.8.2, aplicada al electrón <u>en el estricto sentido newtoniano</u>. (En contraste con los experimentos que discutiremos en los siguientes capítulos, el electrón en el experimento de Thomson se comporta clásicamente.) Simbolizando por ℓ la longitud de la región de desviación y por L la de la región de proyección (llamada también de deriva), se encuentra:

$$m/e = E\,\ell\,L/v^2\delta_e$$

o

$$m/e = B\,\ell\,L/v\delta_b,$$

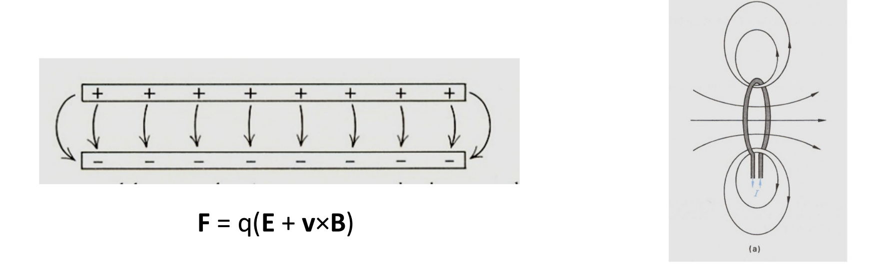
según el caso. La rapidez de los electrones depende solamente de la energía eléctrica suministrada a los electrones al acelerarlos en el campo eléctrico existente entre el cátodo y el ánodo, dependiente de la diferencia de potencial aplicado entre los dos. Thomson la obtuvo tomando la relación entre las dos expresiones anteriores:

* A continuación veremos que el tiempo en el cual el electrón recorre la longitud (horizontal) del tubo es del orden de los nanosegundos. La distancia que caería verticalmente por efecto de la gravedad es insignificante.

$$v = E\delta_b/B\delta_e$$

puesto que la rapidez es la misma en ambos casos. Es notable que el orden de magnitud de la velocidad de los electrones así acelerados es una fracción importante de la velocidad de la luz, del orden de 10^8 m/s. Esto permite no tener en cuenta la atracción que de todos modos ejercerá el campo gravitacional de la Tierra sobre la diminuta masa de los electrones, del orden de 10^{-31} kg: el tiempo que tardan en cruzar la región de desviación es del orden de 10^{-9} s, lo cual se traduce en *caída gravitacional* insignificante, despreciable para los cálculos.

'Jugando' con voltajes y campos de variadas intensidades, Thomson pudo finalmente controlar y medir las desviaciones y probar al mundo científico de su época que el responsable principal de los rayos catódicos era(n) *unas minúsculas partículas*, mucho más diminutas que el supuesto indivisible átomo, presentes por doquier, con manifestaciones visuales impresionantes en las auroras boreales y australes y en todo tipo de descargas eléctricas fuertes.



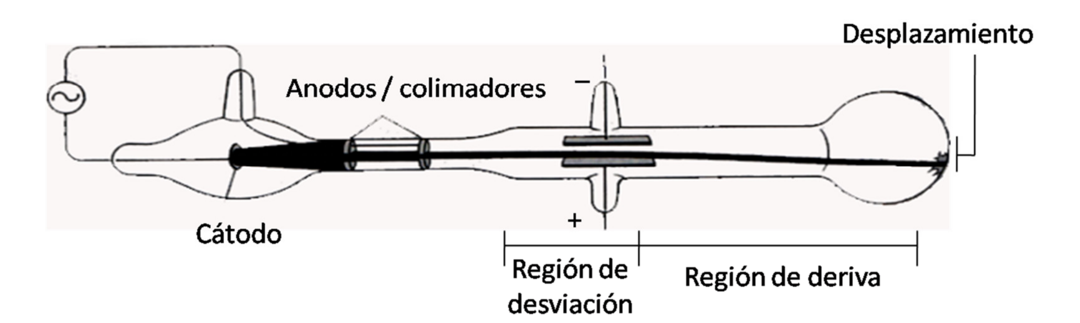


Figura 2.32 Vista esquemática de un tubo de rayos catódicos similar al utilizado por Thomson para establecer experimentalmente la relación entre la masa y la carga del electrón. En la parte superior se reproducen las figuras de secciones anteriores que ilustran campos eléctricos (borde superior izquierdo) y magnéticos (derecha) como los utilizados por Thomson en su experimento para desviar los electrones. Para producir un campo magnético uniforme en la región de deriva, Thomson utilizó una configuración de dos enrrollamientos denominados "bobinas de Helmholtz".

Los experimentos de Thomson solo permitían determinar la relación entre la carga y la masa de las partículas que seguimos denominando electrones y a las cuales asignamos, por el error involuntario de Faraday, una carga negativa: carga que hasta hace relativamente poco era la mínima posible y múltiplos de la cual serían las posibles cargas observadas en la naturaleza, en

particular en los núcleos atómicos, hasta que se descubrió que los quarks tienen carga fraccionaria (un tercio o dos tercios de la carga del electrón).

En otras palabras, los tales rayos catódicos que finalmente se dejaron desviar por campos eléctricos y magnéticos suficientemente intensos son los mismos que producen esos campos, en condiciones usuales menos extremas. Esas partículas iban a ser los actores principales en la electrónica de los tubos de vacío de la primera mitad del siglo XX, mientras que en la segunda, acompañados de los *huecos* o *agujeros* ('holes') que ellos mismos dejan al ser desprendidos por campos internos en semiconductores dopados, *huecos viajeros* cargados positivamente, pues son *carencia* de carga negativa, darían igualmente lugar a la electrónica del silicio y de otros materiales de *banda prohibida* (semiconductores). Esas dos revoluciones, la de los tubos de vacío y la de los transistores, están separadas además por una brecha conceptual: la que hay entre el mundo clásico y el mundo de los fenómenos cuánticos.

Las últimas expresiones, semiconductores, brechas, donadores, aceptores, etc., tan en boga en la electrónica contemporánea, no tendrían sentido clásicamente. No solo eso, el electrón tiene mucho más para ofrecernos que simplemente producir las corrientes que circulan en diodos y transistores. Este ente cuántico por excelencia habría de revelarnos otras pistas sobre el extraño comportamiento de la materia a nivel submicroscópico. Referimos al lector a la excelente obra de Eugenio Ley Koo, *El electrón centenario* (serie Ciencia para todos # 165, FCE), en donde se hace un meritorio recuento del siglo del electrón (Siglo XX). Recomendamos esa obra porque, además de bien escrita, en lenguaje ameno y sencillo, suple la información sustancial sobre tan imprescindible partícula elemental y su singular papel en las revoluciones tecnocientíficas de los siglos XX y XXI, a las cuales es obligado dedicar varios capítulos.

2.9.2 Experimento de la gota de aceite de Millikan

Robert Millikan fue un gran experimentalista. Quizá el más minucioso experimento fue el que diseñó para demostrar que Einstein estaba equivocado y que sus tales corpúsculos de luz eran imaginación pura. Procediendo de esta manera, encontró lo que para la época fue la determinación más precisa de la constante de Planck, verificando de paso las hipótesis de Planck y Einstein. Aunque la precisión de sus medidas ha sido puesta en duda, el más famoso y por el cual, junto al anterior, se le concedió el premio Nobel en 1923 fue el de la gota de aceite para determinar la carga del electrón.

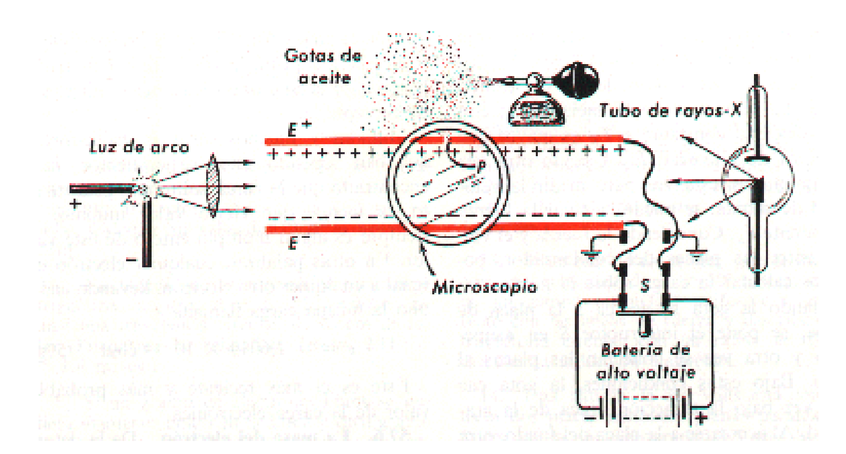
El experimento consiste en inyectar gotitas de aceite con un vaporizador dentro del espacio comprendido entre dos placas metálicas paralelas y horizontales. Dichas placas se conectan a los terminales de una fuente eléctrica de alta tensión, para producir un campo eléctrico que equilibre la atracción gravitacional, el empuje debido al aire y la viscosidad y permita: i) que la gota baje, por efecto de la atracción gravitacional, y adquiera velocidad terminal constante debido a la viscosidad; ii) que la gota suba, aplicando un campo eléctrico que produzca una fuerza hacia arriba mayor a la del campo gravitacional hacia abajo, adquiriendo de nuevo una velocidad terminal. (Figura 2.33.) El haz de rayos X ioniza las gotas que permanecen neutras. El microscopio

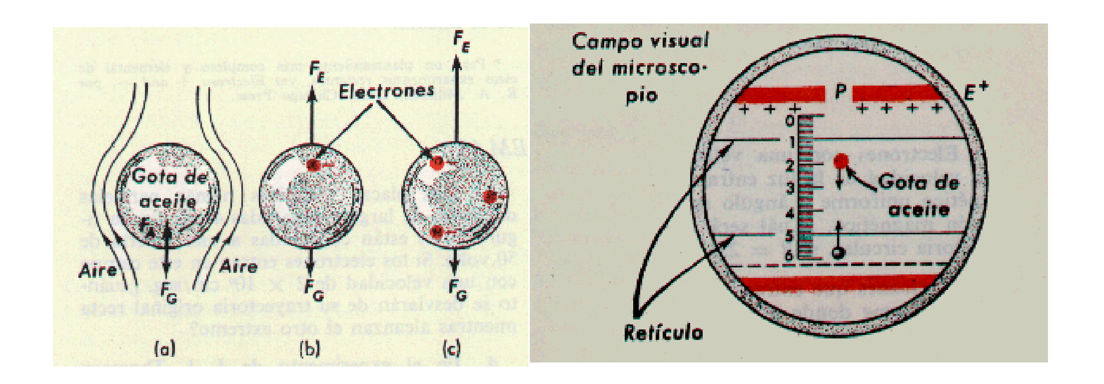
permite visualizar y medir los desplazamientos en función del tiempo. La luz de arco permite la visualización con el microscopio. *

Al acercarse la gota a la placa del fondo, el interruptor S se pone en la posición "abajo", creando un campo eléctrico suficiente para hacer subir la gota en contra de la atracción gravitacional. De nuevo la gota adquiere rápidamente una velocidad terminal que se puede determinar fácilmente.

En todos los casos la carga que se logró determinar en la gota resultó ser siempre un múltiplo entero (entre 5 y 20 veces) de una carga básica de 1,602 x 10^{-19} coulombios, valor que se asignó al electrón. ¡Se había descubierto una nueva constante fundamental! Rutherford es pues responsable de haber determinado con bastante precisión para su época el valor de 2 constantes fundamentales, un mérito que ningún otro físico experimental ha podido igualar.

Figura 2.33. Diagrama del experimento de la gota de aceite. En las placas horizontales se establece un campo eléctrico que puede manipularse a voluntad. Las gotas salen ionizadas de un vaporizador. Lo que se busca es equilibrar las fuerzas sobre las gotas para que se muevan con v constante. La fuerza de viscosidad, opuesta a la dirección de la velocidad, es proporcional a la rapidez, lo que garantiza que la suma de fuerzas finalmente se equilibre, dando lugar a un movimiento (de descenso o ascenso, según el caso) uniforme.





* Las figuras fueron tomadas de la página (Aula Virtual) de José Villasuso Gato http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/claroline/course/index.php?cid=FISICA

Capítulo tercero

Algunos experimentos cruciales

Tan importante para la electrónica del Siglo XX fue el descubrimiento del electrón hecho por J.J. Thomson (1897), más exactamente el establecimiento de su carácter corpuscular, como lo fue la verificación experimental 30 años después (1927) del comportamiento como de onda que a menudo exhiben los electrones. La primera dio lugar a la electrónica de los tubos de vacío, la segunda a la de semiconductores. En el presente siglo la nanoelectrónica sigue haciendo de esta partícula y de su compañero inseparable, el fotón, los protagonistas principales en la optoelectrónica del siglo XXI.

En esos 30 años ocurrieron cambios radicales en la física más que en ningún otro período de la historia. La triunfante electrodinámica clásica enfrentó dos tipos de problemas que no pudo resolver. En primer lugar, fracasó estrepitosamente al predecir resultados absurdos en contra de la evidente estabilidad de átomos y moléculas; en cuanto a la energía de oscilación del campo electromagnético en el vacío, daba un valor infinito para el calor específico correspondiente a esta energía que no corresponde a lo observado. Tampoco fue capaz de explicar el origen de las líneas espectrales, las cuales para el caso del hidrógeno están contenidas en una ley empírica en verdad simple llamada ley de combinación de Ritz de la espectroscopía, según la cual todas las frecuencias observadas pueden expresarse como diferencias entre ciertos términos.

Un ejemplo más de la limitación de la física clásica lo constituyó el comportamiento ambivalente de la luz. Se tenían, por un lado, los fenómenos de interferencias y de difracción, que sólo pueden ser explicados mediante una teoría ondulatoria; por el otro, se habían observado fenómenos tales como la emisión fotoeléctrica y la dispersión (*scattering*) de electrones libres, que indican que la luz está compuesta por pequeñas partículas, cada una con una energía y un momentum muy bien definidos, valores que dependen solo de la frecuencia de la luz y aparecen con una existencia tan real como la de los recién descubiertos electrones. Ese comportamiento corpuscular de lo que se suponía eran ondas lo demostraron inequívocamente Compton y Millikan. Por otra parte, no se observa nunca una fracción de fotón.

Para agravar la situación, otros experimentos demostraron que ese extraño comportamiento no era exclusivo de la luz, sino que era completamente general. Finalmente se puede afirmar que todas las partículas materiales, átomos y moléculas, incluidos fullerenos y enormes biomoléculas, exhiben propiedades ondulatorias que se ponen de manifiesto en condiciones adecuadas. Aquí el problema no consiste solo en una imprecisión del modelo clásico y de sus leyes del movimiento, sino en una insuficiencia de los conceptos para proporcionar una descripción adecuada de los fenómenos. *La imagen mecanicista del mundo resulta insuficiente para describir la realidad*.

Las características ondulatorias del electrón, verificadas mediante técnicas diferentes y de manera independiente por Clinton Davisson y Lester Germer, en Estados Unidos y por George Paget

Thomson (hijo de J.J. Thomson) y Alexander Reid, en Inglaterra, no solo fueron la comprobación experimental de la hipótesis de *ondas de materia* formulada por de Broglie, sino que establecieron claramente su comportamiento ambiguo, a la vez corpuscular y ondulatorio, extendido después a todo sistema físico. Los resultados de esos experimentos dieron origen a dos principios de la nueva física: el de *la dualidad onda-corpúsculo* y *el principio de complementariedad*.

En orden cronológico, antes de observar el comportamiento ondulatorio, se obtuvo un resultado experimental intrigante al que nos referiremos en la sección 3.5. El experimento se conoce con el apellido de sus realizadores, Otto Stern y Walther Gerlach, llevado a cabo en 1922. El experimento pone de manifiesto una propiedad intrínseca del electrón y de toda partícula elemental, por tanto de cualquier sistema compuesto, como lo son átomos y moléculas, propiedad que está ausente en el mundo de los objetos clásicos: *el espín*. En el caso de los electrones, el resultado es maravilloso, pues ilustra cómo esa nueva cantidad, el espín, solo puede tomar dos valores y nada más, otra vez un aspecto (espectro) discreto o *cuántico*, como la energía, de un sistema elemental. Las aplicaciones en la electrónica del futuro todavía se cocinan en el laboratorio, para dar lugar a la *espintrónica*.

Demos ahora una ojeada al carácter ondulatorio del electrón. Davisson y Thomson hijo compartieron el premio Nobel en 1937 "por su descubrimiento experimental de la difracción de electrones por cristales", 40 años después de descubierto el corpúsculo cargado. Padre e hijo habían descubierto, cada uno de ellos, un aspecto o característica con la que se manifiesta esta partícula, una materialización de su existencia *dual*. Cuando el experimento de difracción de electrones se montó, ya era claro que también los rayos X, en general los rayos de luz visibles e invisibles, exhiben un comportamiento dual.

Las manifestaciones ondulatorias del electrón, por otra parte, sugirieron el diseño de microscopios electrónicos y sirvieron de fundamento al intento inicial, exitoso al cabo de cinco años, de construir un primer prototipo. Algunos detalles de interés sobre la evolución histórica del principio de dualidad onda-corpúsculo pueden verse en el libro de Gribbin, *En busca del gato...* Una descripción conceptual de éste y temas similares se encuentra en un libro más reciente del mismo autor, (*En busca de SUSY: Supersimetria, cuerdas y la teoria del todo*, Crítica, 2001) y en muchas de las referencias suministradas al final. Para una discusión epistemológica más profunda, véase la colección de trabajos presentados durante el congreso *100 Años de Teoría Cuántica. Historia, física y filosofía*, organizado por la Universidad Complutense, recopilados en el libro: *Física Cuántica y Realidad*. (C. Mataix y A. Rivadulla, editores, Facultad de Filosofía, Editorial Complutense, S.A., Madrid, 2002.)

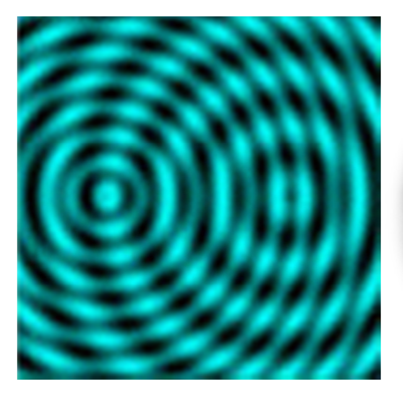




Figura 3.1. Si los electrones se comportasen como ondas al pasar por las rendijas, el patrón esperado en la pantalla sería similar al de la superposición de dos franjas luminosas, cada una de ellas imagen de una de las rendijas. Fue en 1961 cuando Claus Jönsson, en Tübingen, Alemania, llevó a cabo el experimento en el mundo real con electrones y comprobó una vez más que nuestra realidad es dual. El experimento se hace hoy con átomos y macromoléculas. En

Desde el punto de vista conceptual, es más esclarecedor discutir un sencillo experimento de interferencia que los experimentos de difracción realizados desde 1923 pero interpretados correctamente sólo hasta 1927. Sobre éste último aspecto, se recomienda leer los comentarios hechos por Gribbin en el primer libro de él citado (pgs.74 y siguientes). Por otra parte, el experimento de interferencia más famoso suele denominarse *de las dos ranuras* o *rendijas*. En el caso de los electrones, el experimento solo pudo materializarse 35 años más tarde (1961); aún hoy en día se considera de difícil realización. Por sorprendente que parezca, el artículo en que fue descrito originalmente, quizá por estar escrito en alemán, pasó desapercibido para los lectores de habla inglesa (y española), hasta cuando fue publicado en inglés por el *American Journal of Physics* 13 años después (1974).[17]

La discusión del 'experimento de las dos rendijas' que presentamos en la sección 3.7 sigue básicamente el esquema de una de las conferencias públicas conceptualmente más ricas de Feynman: *Comportamiento cuántico*, capítulo 37 del volumen I de sus 'Lectures', reproducido en el capítulo 1 del volumen III y en *Seis piezas fáciles*.

Es ilustrativo y a la vez divertido consultar el último capítulo del *best-seller* 'De Arquímedes a Einstein', escrito por Manuel Lozano Leiva con motivo de la publicación a fines de 2002 de los resultados de la encuesta sobre los diez experimentos más bellos de la física. El primer lugar lo ocupó precisamente el realizado por Jönsson (véase el recuadro anterior), sin que la mayoría de los encuestados supieran siquiera que el experimento hubiera sido realizado, mucho menos conocieran el nombre del protagonista principal. Aprovecho esta cita para promocionar también el experimento de Young, otro de los seleccionados por la muestra de la encuesta, al que nos referimos en el capítulo anterior, y el cual seguirá siendo crucial para una mejor comprensión de los resultados de este capítulo. Los experimentos famosos invariablemente tienen un nombre, el de su gestor (o gestores), asociado a ellos: Arquímedes, Eratóstenes, Galileo, Newton, Cavendish, Young, Foucault, Millikan, Rutherford… para mencionar solamente los de la lista, aunque no debió dejarse por fuera el de Michelson y Morley ya citado. Pero el *experimento de las dos ranuras* se llama simplemente así, sin hacer referencia a su protagonista principal. Es evidente que el experimento de Jönssen no era conocido por Feynman, quien escribe en su *Lecture* (la última en *Seis piezas fáciles*): "Habría que decir antes de seguir que ustedes no deberían tratar de montar

[17] Véase, por ejemplo, la versión electrónica del interesante artículo *The double slit experiment*, http://physicsworld.com/cws/article/print/9745, del editor de *Physics World*, Peter Rodgers

este experimento... Este experimento nunca ha sido realizado exactamente así. La dificultad está en que el aparato tendría que construirse a una escala imposiblemente pequeña para mostrar los efectos en los que estamos interesados. Estamos realizando un «experimento mental», que hemos escogido porque es fácil de imaginar. Sabemos los resultados que se *obtendrían* porque se *han* realizado muchos experimentos en los que la escala y las proporciones han sido escogidas para mostrar los efectos que vamos a describir.” Confieso sin rubor que estuve engañado por esta percepción equivocada, aprendida de Feynman, durante varios años. Más recientemente se publicó en *Investigación y Ciencia* (Julio de 2007; Scientific American en español) un artículo que promete al lector poder realizar *un borrador cuántico doméstico* (tal es el título del artículo escrito por Hillmer y Kwiat, de la Universidad de Illinois). Así que este tipo de experimentos ya no debe intimidar a quienes se propongan verificar la *realidad cuántica*.

Por otra parte, el experimento de Stern-Gerlach tiene una doble importancia conceptual adicional que no suele destacarse: a) aunque los electrones se comportan en dicho experimento como corpúsculos, el observable de interés, el espín, exhibe un comportamiento cuántico que no tiene análogo clásico; b) por ser un sistema de dos estados, su descripción matemática es muy sencilla, de hecho es el sistema ideal para discutir lo que se denomina *principio de superposición*, tema central de este y el siguiente capítulo.

El procedimiento (descripción experimental) que adoptaremos en el presente capítulo nos servirá de fundamento para la formulación teórica que haremos en el próximo. Empezaremos con el efecto fotoeléctrico.

3.1 Fotones y electrones

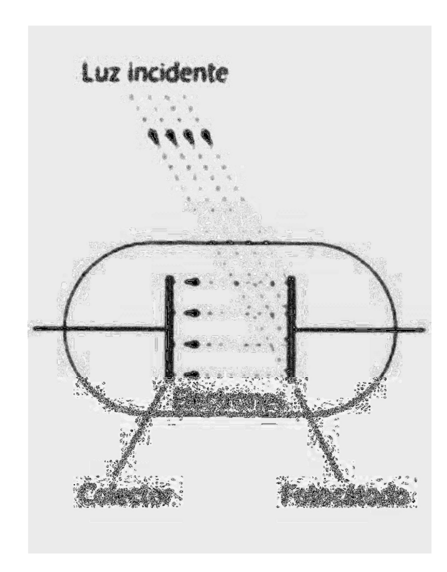
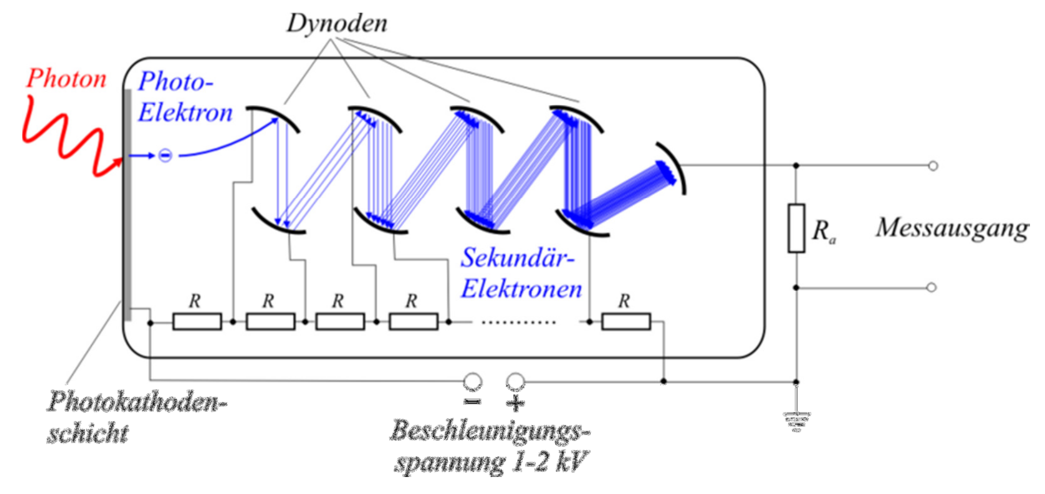


Figura 3.2 Efecto fotoeléctrico. Los fotones incidentes sobre el cátodo desprenden fotoelectrones.

La primera aplicación de la hipótesis de Einstein sobre los granos de energía en la radiación permitió la explicación del efecto fotoeléctrico. Esta explicación no fue muy aceptada al comienzo, a pesar de que permitía entender también la desesperada solución dada por Planck al problema

de la radiación de cuerpo negro. El fenómeno fue tratado someramente en el libro *Genio entre genios*, al cual remitimos al lector.



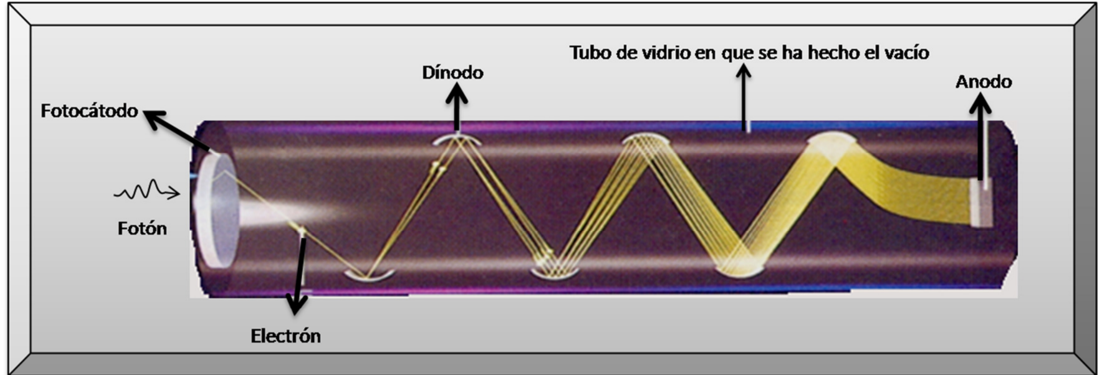


Figura 3.3 Esquema de un fotomultiplicador. (La imagen superior ha sido puesta en dominio público por su autor J. Krieger, dentro del proyecto wikipedia. La inferior, reproducida de *Genio entre genios*.)

Dejando de lado la denominada *radiación de cuerpo negro*, un efecto macroscópico a la postre difícil de entender en los cursos básicos, el efecto fotoeléctrico puede considerarse *el fenómeno más fundamental* para el surgimiento de la nueva física. No le dedicaremos más tinta, salvo para ilustrar conceptualmente lo que ocurre sin entrar en detalles: la luz incidente desprende del metal electrones (se denominan fotoelectrones) que pueden considerarse *libres*, salvo porque los separa del *vacío* una energía negativa, de *amarre*; los fotoelectrones absorben de los fotones incidentes esa energía que requieren y un poco más, por lo que van a tener una *energía residual* en forma de energía cinética o de movimiento; el voltaje aplicado entre cátodo y ánodo (colector) disminuye esta energía, logrando detener algunos; qué tantos, depende del voltaje aplicado. La relación es rigurosamente lineal con la frecuencia de los fotones incidentes, lo que verifica la famosa aserción de Einstein, $E = hv$ para la energía de los *granos de energía* incidentes.

Los fotomultiplicadores constituyen quizá una de las aplicaciones más importantes del efecto fotoeléctrico. Ilustrar su funcionamiento ayuda a comprender mejor aquel y nos convence mucho más del comportamiento dual de la luz. En esencia, se produce un efecto en cascada de la emisión de fotoelectrones, lo que permite amplificar corrientes en varios órdenes de magnitud y, al mismo tiempo, detectar el paso de fotones individuales. Mayores detalles pueden verse en mi libro sobre Einstein.

(Para ampliar la discusión conceptual sobre el *efecto fotoeléctrico*, recomiendo el cuadro de la página 42 del libro *Quantum, a guide for the perplexed*, reproducido a continuación.)

Einstein's Nobel Prize

Albert Einstein was awarded the 1921 physics Nobel Prize for his explanation of the photoelectric effect, which was regarded at the time as a more significant discovery than his more famous work on relativity theory.

According to Einstein, each electron is knocked out when it is hit by a single photon of light, the energy of which depends on its frequency. He argued that the reason we do not normally see the particle-like nature of light is due to the large number of photons involved, just as we do not see individual pixels of ink on a printed image. So let us examine briefly how this picture solves the three puzzling features of the photoelectric effect.

The first is easy. The dependence of the ejected electron's energy on the light's frequency rather than its intensity is a direct consequence of Planck's equation relating the energy of the light to its frequency.

The second feature arises because the threshold for production of the electrons only occurs when the photon energy is sufficient to release an electron. Increasing the intensity of the light just means more photons. And since photons are so minuscule and localized in space, the likelihood that any one electron could acquire sufficient energy to escape through being hit by more than one photon is tiny.

Finally, the process is instantaneous because the electrons do not have to accumulate their energy from a wave that is spread out in space. Instead, each photon delivers all its energy to an electron in a single collision. If this energy is above the necessary threshold the electron will escape.

The photoelectric effect involves knocking electrons off a metal surface by shining light on it. However, thinking of the light as being made up of waves does not explain observations. Only by considering it to be composed of individual particles (photons) can we explain what is seen.

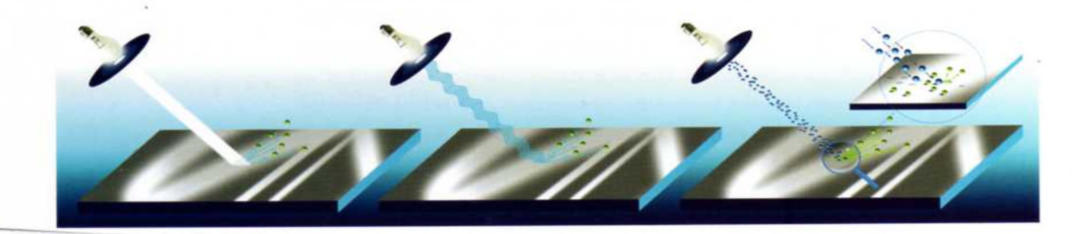


Figura 3.4. Premio Nobel de Einstein. Recuadro reproducido del texto *Quantum*, Al-Khalili, 2003.

Hay 3 características del comportamiento de los fotoelectrones destacadas en este texto que quiero mencionar, en forma resumida:

1. La capacidad de la luz para desprender electrones depende de su frecuencia

2. El efecto solo se presenta por encima de cierta frecuencia, la cual depende del material.

3. Los electrones, al absorber la luz, requerirían clásicamente de un cierto tiempo, pero se observa que el fenómeno ocurre instantáneamente.

3.2 Dispersión de fotones

Menos de treinta años después del hallazgo del electrón, se realizó otro experimento tan crucial como el que puso en evidencia esas partículas de carga elemental: el mismo que reveló el comportamiento ondulatorio de la materia corpuscular. Antes de aquel acontecimiento, Arthur Compton se había encargado de mostrar experimentalmente que los *granos de luz* eran reales, no

un simple modelo teórico para explicar los resultados de algunos experimentos, entre ellos el efecto fotoeléctrico. Venía trabajando con rayos X desde 1913 y le tomó 10 años más llegar a tan importante conclusión.

En 1909, cuando su fama le permitió dejar el cargo de empleado de patentes para convertirse en profesor adjunto en Zürich, Einstein afirmó: "En mi opinión, la fase siguiente en el desarrollo de la física teórica nos llevará a una teoría de la luz que podrá considerarse como una especie de fusión entre la teoría ondulatoria y la corpuscular". En los años siguientes, concentrado en su teoría general de gravitación, despreocupado en gran medida por lo que a su lado estaba pasando con ese otro universo que él mismo ayudó a crear, el de los *quanta*, Einstein daba indicios de ducho detective a los nuevos físicos, pistas que les llevaría ineludiblemente a fusionar los dos puntos de vista, el ondulatorio y el corpuscular. A continuación se verá cómo se procedió en el caso de la luz, y cómo de paso se preparó el terreno para hacerlo en el caso del electrón y de todo lo demás.

Si m representa la masa en reposo de una partícula, su energía *en reposo* es la famosa expresión de Einstein $E_o = mc^2$. Para escribir la energía total E de la partícula en movimiento, libre de campos o de cualquier tipo de interacción, hay que tener en cuenta que esa masa crece en la forma prevista por la relatividad: $m/(1-v^2/c^2)^{1/2}$. Si se adopta para la masa *total* (acrecentada por la rapidez) el símbolo M, podemos escribir $E = Mc^2$; otra forma de hacerlo es separar las dos formas de energía, la de reposo y la de movimiento, para lo cual se recurre a la cantidad de movimiento de la partícula, $p = Mv$, y a su energía, $E = h\nu$; el resultado, no solamente sencillo sino extremadamente útil para la fusión de los dos puntos de vista, es:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2.$$

Esa fórmula encierra sutilmente el teorema de Pitágoras, si se visualiza uno de los catetos (de longitud invariable mc^2; recuerde que m es la masa en reposo) como la medida de la energía en reposo de la partícula; el otro (de longitud pc) representa su energía debida al movimiento. Pero hay mucho más que eso. Puesto que las partículas de luz no tienen masa en reposo, se encuentra para ellas una relación de gran importancia para dar el paso siguiente: $E = pc$, o más nítidamente: $p = E/c$. Las partículas de luz tienen energía y, por ende, cantidad de movimiento.

Las relaciones anteriores son no solamente útiles sino conceptualmente muy importantes. Ya se sabía, desde cuando se formularon adecuadamente las leyes de la electrodinámica, que la luz transporta energía y transporta cantidad de movimiento, como ocurre con cualquier otro tipo de movimiento ondulatorio. Ahora estamos diciendo algo que no tiene duda: cada uno de los granos de luz lleva energía y momentum, el problema era saber cuánto de lo uno y de lo otro. Con la hipótesis de Planck y su extensión hecha por Einstein, resulta que $E = h\nu$. La descripción ondulatoria de la luz permite reescribir la expresión anterior, $p = E/c$, en términos de su longitud de onda:

$$p = h/\lambda = \hbar k,$$

($k = 2\pi/\lambda$) una clave de trascendental importancia para dar los pasos siguientes en el desarrollo de la nueva física. El primero le correspondió a Compton, como ya dijimos; el segundo a de Broglie.

Después de realizar una serie de experimentos a comienzos de los años 20, Compton había llegado a la conclusión, en 1923, de que la interacción entre rayos X y electrones solo podía

explicarse si los rayos X, ondas de luz no visible, se trataban también como partículas. Dicho en términos sencillos: los *granos* de rayos X en su interacción con electrones muy levemente ligados a la materia, como es el caso de electrones *metálicos*, cambian su frecuencia, reduciéndose o disminuyendo ésta en dicho proceso, alargando su longitud de onda, preservando su velocidad $c = \lambda\nu$.

Era obvio que el haz incidente tenía que perder energía, pero ello hubiera podido significar una disminución en la intensidad; por el contrario, el resultado experimental mostraba claramente un aumento en la longitud de onda del haz emergente. La clave está en la fórmula anterior, $p = h/\lambda$, y en suponer que el electrón, prácticamente libre como puede estarlo un boliche sobre una superficie plana sin roce, es golpeado por *un grano* de luz. Al perder algo de su cantidad de movimiento, después de habérsela comunicado al electrón, el cual saldrá despedido en alguna dirección oblicua con respecto a la del grano de luz incidente, con velocidad comparable a la velocidad de la luz, aumenta su longitud de onda, lo que está de acuerdo con el resultado experimental. Los cálculos cuidadosos revelaron lo certero del razonamiento. Al año siguiente Einstein afirmaría perplejo: “resultan entonces dos teorías de la luz, ambas indispensables... sin ninguna relación lógica”.

La explicación del efecto Compton fue, quizá, el mayor triunfo en la dirección de encontrarle asidero experimental a la audaz propuesta de Einstein.

Dedicaremos unas cuantas líneas al efecto confirmado, más bien que descubierto, por Compton. El lector puede reforzar el concepto con las imágenes que se muestran, por ejemplo, en un virtual:

http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000440/lecciones/naturaleza_corpuscular_radiacion/efectocompton.htm

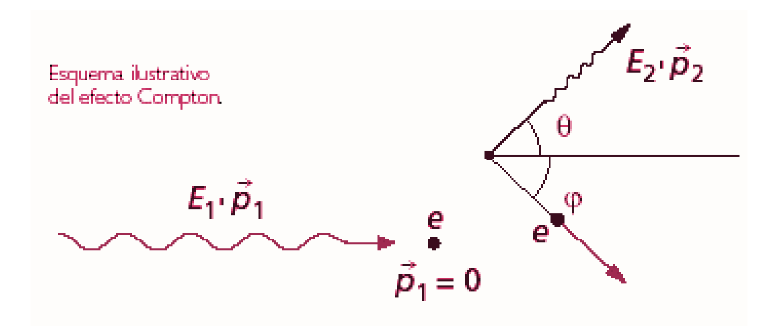


Figura 3.5 Esquema de la dispersión de un fotón por un electrón, en el denominado *efecto Compton*. A la izquierda se ilustran los valores iniciales de energía y momentum de las dos *partículas*: $E_1 = \hbar\omega_1$, $\mathbf{p}_1 = \hbar\mathbf{k}_1$; la energía inicial del electrón es $E_o = mc^2$, siendo m su masa en reposo; su cantidad de movimiento inicial es cero. A la derecha se esquematizan esos valores después de la dispersión: $E_2 = \hbar\omega_2$, $\mathbf{p}_2 = \hbar\mathbf{k}_2$; la cantidad de movimiento del electrón es $\mathbf{p} = M\mathbf{v}$, con $M = m/(1-v^2/c^2)^{1/2}$; su energía final es $E = Mc^2$.

Entender lo que ocurre es muy fácil si se adopta el esquema corpuscular para la luz: uno entre el enjambre de fotones que constituye la radiación incidente es *dispersado* por uno de los muchos electrones *cuasi-libres* que hay en un metal. La energía del fotón incidente debe ser elevada, de ahí la necesidad de utilizar cálculos relativistas, bosquejados en la leyenda de la figura 3.5: ha de

pertenecer a la región ultravioleta del espectro, por lo menos estar en la región de los rayos X. El fotón dispersado tiene una frecuencia menor, debido a que transfirió parte de su energía y de su cantidad de movimiento al electrón.

3.3 Difracción de electrones

Pero las pistas y los razonamientos en la dirección de la dualidad venían de tiempo atrás. William H. Bragg, quien conjuntamente con su hijo fuera galardonado con el premio Nobel en física en 1915, decía en 1912 comentando las ideas contradictorias que se tejían alrededor de los rayox X: "El problema está, no en decidir entre dos teorías sobre los rayos X, sino en encontrar... una teoría que tenga la capacidad de ambas."

Establecido experimentalmente el carácter dual de la luz, no parecía difícil hacer lo mismo con el electrón, cuyas supuestas órbitas ya habían sido cuantizadas por Bohr. La tarea meticulosa correspondió a de Broglie. Acogiendo la idea de la dualidad onda-partícula, la desarrolló matemáticamente para el caso particular del electrón, describiendo de paso no solo el comportamiento de *ondas de materia* sino también sugiriendo las formas bajo las cuales podrían ser observadas. Su hermano Maurice, reconocido físico experimental, fue su gran auxiliar en la tarea. Aprovechando el laboratorio montado en París por este último, Louis Victor Pierre Raymond, su nombre de pila completo, desarrolló no solo algunos experimentos sino también los primeros trabajos teóricos con el fin de demostrar su hipótesis y los publicó en 1923. Puestas en orden sus ideas, las presentó en forma más completa para optar al título de doctor; el examen tuvo lugar en la Sorbona en noviembre de 1924 y la tesis correspondiente fue publicada en 1925.

De Broglie fue más allá que todos sus predecesores y postuló que la misma dualidad partícula-onda que aquejaba a la luz se halla presente cuando se trata de electrones, protones y otras partículas de pequeña masa. Supuso que a toda partícula de masa M (relativista) debe asociarse una onda, cuya longitud de onda es inversamente proporcional a su cantidad de movimiento $p = Mv$. Como en todos los efectos cuánticos, la constante de proporcionalidad es la constante de Planck; así, pues:

$$\lambda = h/p,$$

la misma fórmula para fotones, pero aplicada ahora a toda partícula material. Era el origen de la onda piloto o, en otras palabras, *el nacimiento de ondas de materia*: la superposición, o mejor, la interferencia y la difracción, no son propiedades exclusivas de las ondas, si es que alguna vez supimos qué era una onda.

Cómo llegó de Broglie a postular su famoso resultado, es algo que vale la pena resaltarse: es el método de ensayo y error que a menudo sigue la ciencia. Estableció comparaciones, en ocasiones exitosas, a veces demasiado ingenuas. Lo que para Bohr eran órbitas estables, para de Broglie resultaron ser ondas estacionarias. Razona de Broglie, en su tesis:

> Los únicos fenómenos que implican números enteros en física son los de interferencia y los relativos a los modos normales de vibración... Este hecho me llevó a pensar que los electrones no podían continuar siendo entendidos simplemente como corpúsculos, sino que había que asignarles algún tipo de periodicidad.

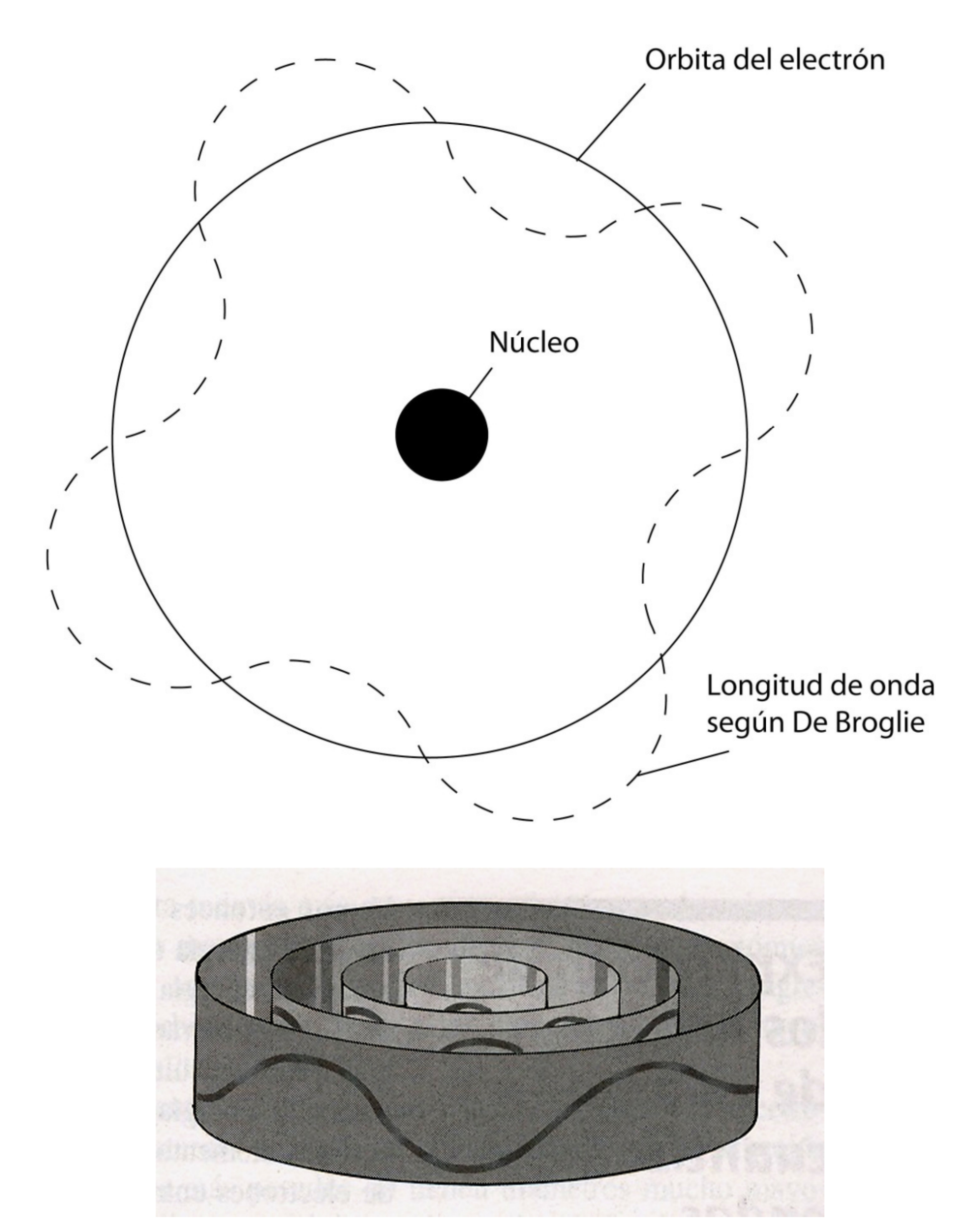


Figura 3.6 Órbitas estacionarias vistas como modos normales de ondas de materia.

Modos normales de vibración son los que ocurren en cualquier tipo de oscilador clásico. Los instrumentos musicales se construyen para que puedan dar lugar a distintos modos normales, pudiéndose generar con ellos una combinación melódica de frecuencias y tonalidades. Una cuerda fija por los dos extremos (recuérdese la figura 2.17), solo permite la formación de ciertas frecuencias, armónicos, a partir de un modo fundamental. Lo mismo ocurre con los tubos de un órgano. Este comportamiento se discutió en la sección 2.6. La analogía con los instrumentos musicales para el caso de los electrones ligados al núcleo la tomó de Broglie muy en serio, y propuso que las órbitas debían de permitir el acomodo preciso de ciertas longitudes de onda para ser estables. Si esta comparación permite entender o no la cuantificación de los estados de energía, no es seguro; pero esa imagen ayudó a una mejor comprensión del mundo de los *quanta* o cuantos.

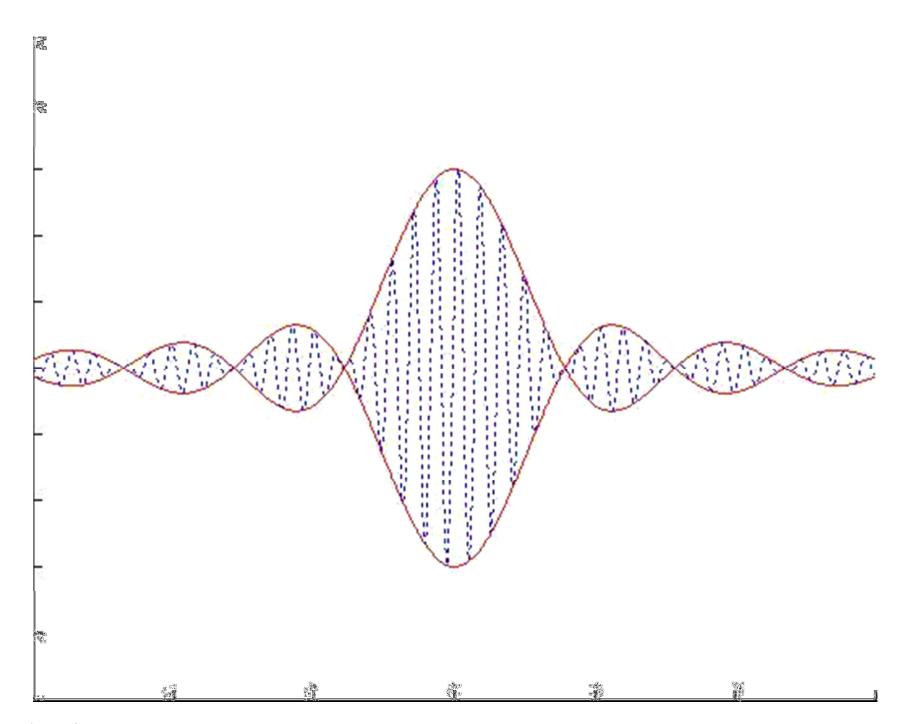


Figura 3.7 Onda piloto.

Tomo textualmente una frase de Lozano Leyva para relatar una anécdota citada por doquier. "Cuando de Broglie presentó su tesis, en 1924, el tribunal de la Universidad de París se quedó boquiabierto. El presidente, nada menos que el insigne Paul Langevin, le envió una copia a Einstein porque no confiaba del todo en tan extravagante hipótesis, y nadie mejor a quien consultar que el gran pope (sic) de la física. La respuesta de Einstein fue contundente: «Creo que la hipótesis de de Broglie es el primer débil rayo de luz sobre el peor de nuestros enigmas en física»."

¿Cómo pudo someterse la hipótesis ondulatoria del físico francés a la prueba experimental? Einstein mismo había encontrado una primera prueba, pues la idea de de Broglie se ajustaba muy bien a su modelo para explicar los valores experimentales del calor especifico de los sólidos: ¡Las vibraciones en los sólidos están cuantizadas! Así que Einstein no solo captó la trascendencia de la hipótesis de de Broglie, sino que pasó la noticia de su descubrimiento a Born, en Göttingen. No olvidemos que Heisenberg para entonces alternaba su tiempo entre Göttingen y Copenhague. Lo más importante para ese momento histórico fue que James Frank, director del departamento de física experimental en Göttingen, sabía de los experimentos realizados por el grupo de Davisson. A Frank no le quedaba duda de que los experimentos de Davisson «¡ya habían establecido la existencia del efecto esperado!» (citado por Max Jammer). Con Germer como nuevo colaborador, Davisson volvió a sus experimentos. Pero fue gracias a un accidente que descubrieron la difracción de electrones en 1927. Cuando estudiaban la forma en que se reflejaban los electrones después de chocar con un blanco de níquel metálico dentro de un tubo al vacío, el tubo se dañó y rápidamente se depositó una capa de óxido sobre el níquel. Para salvar su muestra, los físicos americanos la recalentaron, con lo cual, sin saberlo, formaron superficies cristalinas. Al observar luego los electrones, hallaron para su sorpresa que el haz de electrones no sólo se reflejaba sino que también ¡se difractaba! Y la difracción es uno de esos fenómenos típicamente ondulatorios, como bien lo sabían los físicos desde muchas décadas atrás. ¿Entonces…?

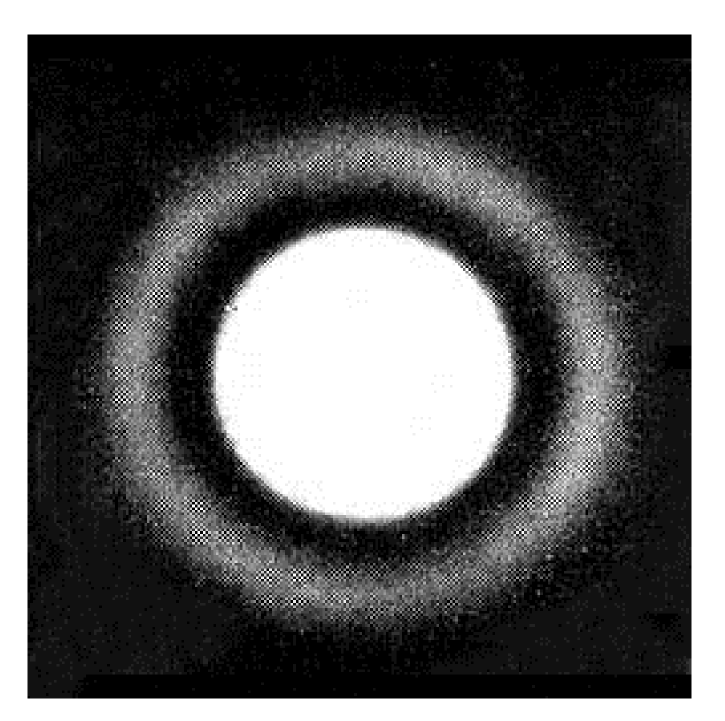


Figura 3.8. Electrones difractados por una hoja de aluminio (detalle).

Patrón de difracción de un haz de rayos X que pasa por una lamina

Patrón de difracción de un haz de electrones al pasar por la lámina

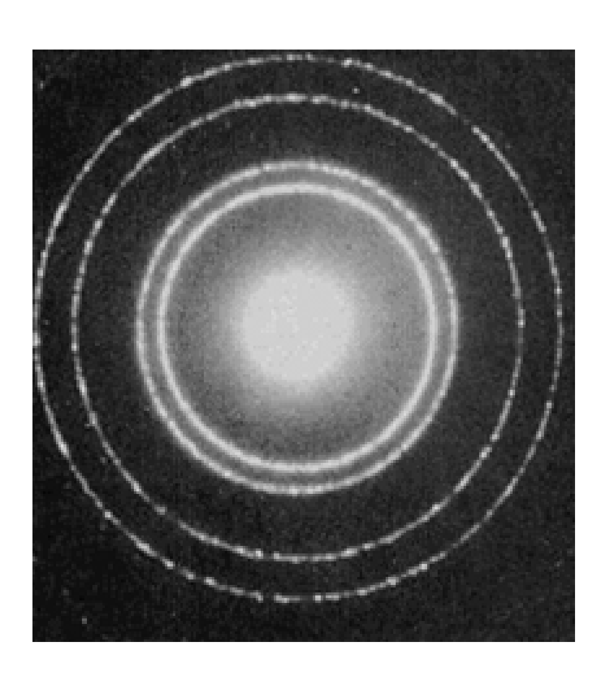


Figura 3.9 a) Comparación de los patrones de difracción de rayos X y de electrones al atravesar una delgada lámina de aluminio.

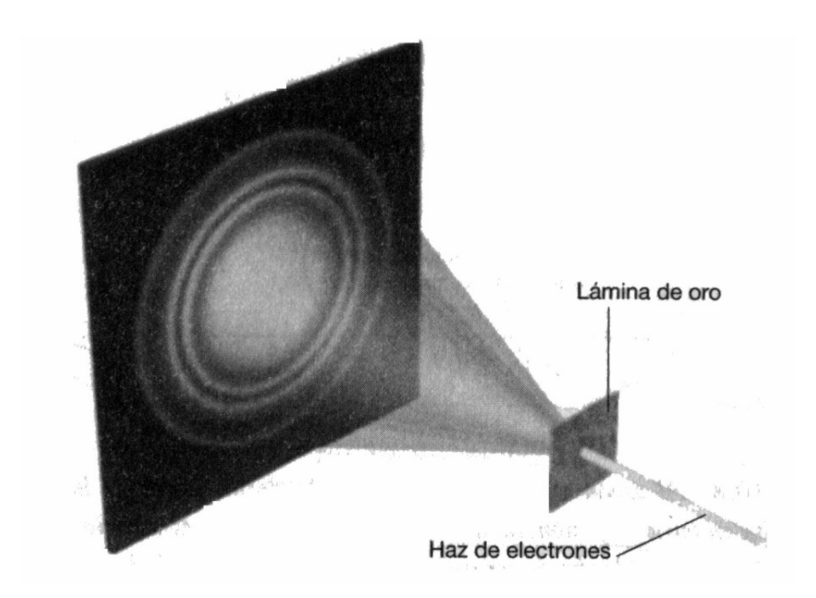


Figura 3.9 b) Esquema del experimento de Thomson, mediante el cual, haciendo incidir electrones sobre una fina lámina de oro, se obtiene un patrón de difracción, característico del comportamiento ondulatorio.

El experimento de Davisson fue confirmado por George Thomson —hijo único de sir J. J. Thomson— en el caso de electrones, por Stern para haces moleculares y por otros investigadores para neutrones y otras partículas. En todos los casos, la ecuación de de Broglie se cumple con alta precisión, con lo cual la mecánica ondulatoria de Schrödinger, como siguiente paso, pudo finalmente abrirse camino.

3.4 Experimento de Stern-Gerlach

El experimento imaginario que se ilustrará en la sección 3.6 permite entender el significado que suele asignársele a la llamada *función de onda*. Es, en esencia, la *materialización* de ese ente matemático en términos probabilísticos. En otras palabras, sirve de fundamento a la *mecánica ondulatoria*, formulada por Schrödinger en 1926. Con el surgimiento de la denominada *nanotecnología* (insisto en que el nombre adecuado debería ser *nanotecnociencia*) se han podido hacer experimentos más persuasivos para los no expertos de los efectos ondulatorios que exhiben los electrones y, en general, los objetos *materiales* (masivos) en el mundo cuántico. Uno de ellos fue realizado en 1983, aprovechado la versatilidad de uno de los microscopios electrónicos más poderosos con que se cuenta hoy, el denominado *microscopio de tunelamiento y barrido*, en inglés denominado ‘scanning tunneling microscope’ y reconocido por sus siglas en ese idioma: el STM.

Sin entrar a discutir el funcionamiento de dicho aparato (lo hemos hecho en el libro de *Nanotecnociencia*), enfatizando que para el *modo de imagen* (el otro modo se denomina *de manipulación*) se amplifica una corriente electrónica que se produce por el denominado *efecto túnel* (véase capítulo quinto) y se *barre* (‘escanea’) sobre la superficie que se observa, de ahí el nombre. El sorprendente y hermoso resultado se ilustra en la figura 3.10.

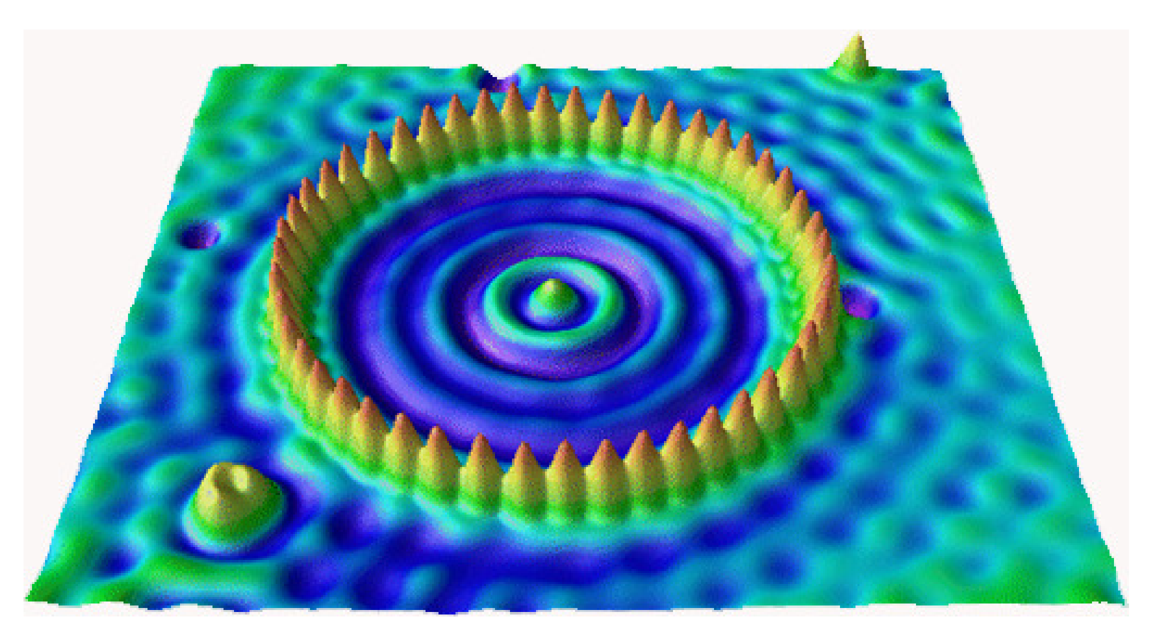


Figura 3.10. Micrografía de tunelamiento y barrido, lograda con el STM, mostrando las ondas electrónicas que aparecen cuando 48 átomos de Fe se sitúan formando un círculo sobre una superficie de cobre. En realidad, lo que se está midiendo con el experimento es la *amplitud de probabilidad* (siguiente capítulo). Para más detalles, véase el libro ya referido sobre *Nanotecnociencia*. (Figura tomada de la página de IBM; se muestra y explica en muchos textos de física general.)

Hay otro experimento cuyos resultados pueden formularse recurriendo a lo que se denomina combinación, mezcla o *superposición de estados*; sirve para ilustrar la *naturalidad* de la formulación matricial de la mecánica cuántica, la otra formulación equivalente de la física cuántica, a partir de uno de los aspectos más cruciales de ella: el principio de superposición. Se trata del experimento de Stern y Gerlach, el cual llevó además al concepto de *momentum angular intrínseco*, característica *interna* de toda partícula (al igual que su masa en reposo y su carga), a la postre de todo sistema físico. La formulación matricial fue resultado del trabajo conjunto de Jordan, Born y Heisenberg (*el trabajo de los tres hombres*), al que se unieron Pauli y Dirac. Sin entrar en detalles, el aspecto principal de todo el trabajo de tanto talento junto fue dar con la no conmutatividad de las llamadas *variables canónicamente conjugadas* y explotar ese hecho algebráicamente.

El experimento al que nos estamos refiriendo fue diseñado y realizado por los físicos alemanes Otto Stern y Walther Gerlach, en 1922. Stern participó después en los experimentos que exhibieron claramente por primera vez la difracción de átomos y moléculas y fue galardonado con el premio Nobel en 1943. El experimento de Stern y Gerlach muestra claramente cómo la medición u observación de ciertas variables afecta los valores del observable y cómo en general los *estados cuánticos* hay que describirlos por medio de *números complejos*. El experimento permitió formular el principio de superposición, tema del próximo capítulo, uno de los principios más fundamentales de la teoría cuántica, y puso de relieve las peculiaridades de una nueva cantidad, por ellos descubierta: el espín del electrón.

La particularidad del espín es la de poderse *alinear* con la dirección de un campo magnético externo, algo similar a lo que ocurre con las limaduras de hierro. Si se piensa en cada pequeña limadura como si fuera un imán diminuto, al que se le asignan polos norte y sur, como es usual, la analogía es más directa: espín hacia arriba es la orientación del momentum angular intrínseco en la dirección del campo; espín hacia abajo lo es en dirección opuesta. Si se compara esta situación con la orientación de las dos caras de una moneda, puede construirse una imagen mental más sencilla: cara o sello (Colombia), águila o sol (México), cara o ceca (Argentina), etcétera, según el país, son los resultados posibles del lanzamiento de la moneda; aunque no conduce a valores positivos o negativos, característicos de la orientación del momentum angular intrínseco con respecto a un eje, sólo hay dos resultados posibles. Nótese que, a diferencia de la moneda, en el caso de la partícula con espín la orientación del eje es arbitraria, puesto que el experimentador puede orientar el campo magnético externo a voluntad, lo que no puede hacerse con el campo gravitacional de la Tierra si el experimento de la moneda se hace en las condiciones usuales.

El espín tiene la particularidad de acoplarse a las *propiedades de rotación* del medio. Suele asociarse con una rotación interna. Pero imaginarlo como debido a una rotación de la partícula sobre sí misma es inconsistente: es inconsistente con el principio de incertidumbre, pues la incerteza en una vuelta para el ángulo de giro llevaría a una incerteza en la velocidad de rotación cercana a esa velocidad; en consecuencia, su valor no podría ser *tan preciso* (nadie duda que es en magnitud $\frac{1}{2}\hbar$); es inconsistente con la relatividad, pues exigiría una velocidad de rotación mayor a la que podría físicamente aceptarse; por último, es inconsistente con el concepto de partícula puntual que tenemos del electrón. Para salir del paso, simplemente aceptemos que es un efecto relativista, como lo demostró Dirac. Más adelante se volverá a las propiedades muy peculiares de esta nueva cantidad física característica del submundo cuántico. A continuación se bosqueja el experimento que condujo a precisar sus propiedades.

El experimento de Stern-Gerlach consistió en enviar un haz de partículas de plata a través de un campo magnético inhomogéneo. La variación espacial de la componente del campo magnético se denomina *gradiente* (rigurosamente *componente del gradiente*, pues esa cantidad es un vector) en la dirección escogida. El campo magnético se hace crecer en intensidad en la dirección perpendicular a la que se envía el haz, y obliga a desviar partículas que tengan momento magnético (véase sección 2.8.2). El gradiente de la componente del campo fuerza a las partículas de espín positivo $+\frac{1}{2}\hbar$ a ser desviadas hacia abajo y a las partículas de espín opuesto $-\frac{1}{2}\hbar$ a ser desviadas hacia arriba, en la dirección contraria, pudiéndose así determinar el momento magnético de las partículas.

En el caso clásico, se espera que una partícula cualquiera entre en el campo magnético con su momento magnético orientado al azar. El efecto del campo haría que fueran desviadas dependiendo del grado de deflexión del ángulo inicial entre el momento magnético y el campo magnético al que se somete el haz. Ese efecto se puede graduar mediante la variación de la intensidad del campo en la dirección escogida. En consecuencia, algunas serían desviadas fuertemente, otras de manera más débil y en principio se encontrarían cubriendo todo el *espectro* de intensidades posibles.

El resultado del experimento revela que esto no es así y se observa que las partículas son desviadas o bien hacia arriba o bien hacia abajo, con igual probabilidad, pero ambos grupos con la misma componente de momentum angular (magnitud ½ℏ siempre), proporcional éste al momento magnético. Las partículas exhiben o bien espín (momentum angular intrínseco solamente, dadas las condiciones del experimento) –½ ℏ o +½ℏ, en el sentido del gradiente del campo, sin valores intermedios.

El experimento de los pequeños imanes se hizo con átomos de plata, asumiendo que tanto el momentum angular nuclear, despreciable para el caso, como el de los 46 electrones internos, los cuales se anulan exactamente, no hay que tenerlos en cuenta. Queda así un *electrón periférico*, responsable de los resultados que se observan. El experimento se bosqueja en la figura 3.11; por supuesto que hoy en día podría hacerse con electrones individuales. Los detalles del sistema físico se dejan de lado, para concentrar la atención del lector solamente en los resultados. La disposición de los imanes que hacen desviar los átomos o electrones hacia un lado o hacia el otro (hacia arriba o hacia abajo), debido a la variación espacial del campo magnético que producen, es tal que las probabilidades de orientación final en cualquiera de las dos direcciones son iguales. Lo que sería de esperar clásicamente es que se tenga una distribución continua de valores, digamos entre –½ o +½ (por simplicidad, se suele prescindir de la constante ℏ). Sin embargo, en el experimento se detectan dos haces finamente diferenciados de igual intensidad, con la misma desviación en magnitud pero en sentido contrario.

El resultado del experimento es contundente: el momentum angular intrínseco del electrón en el sentido del campo puede tomar solamente dos valores; se le asigna valor negativo cuando coincide con la dirección del campo y positivo en dirección contraria. La figura para ilustrar este experimento fue tomado de la página:
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/sternGerlach/sternGerlach.html

Una página similar de gran utilidad es la de la Universidad de Toronto:

www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/SternGerlach/SternGerlach.html

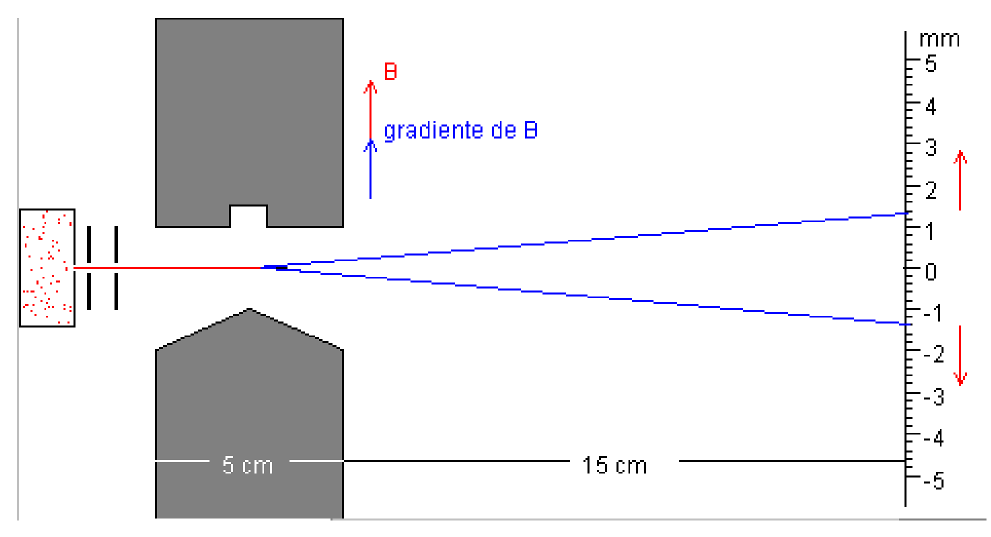


Figura 3.11. Esquema del montaje del experimento de Stern-Gerlach.

Cuando se realizó el experimento, ya se había detectado que los valores de la componente z de los *momenta* angulares *orbitales* de los átomos eran valores discretos, dados por $m\hbar$, donde m es

un entero, positivo o negativo. Más tarde se observó que a estos valores enteros había que agregar un valor semientero.

No podemos cambiar el valor del espín del electrón, pero sí su orientación, esto es, podemos cambiar la dirección de la flecha que lo representa. Si elegimos una dirección cualquiera, arbitraria, y decidimos medir el espín del electrón en esta dirección, lo que medimos es la proyección de la flecha espín en la dirección elegida, y esperamos como resultado algún valor entre el máximo, +½ , y el mínimo, –½. Para ello vamos a describir varios experimentos que se han realizado, arrojando siempre los mismos resultados .

3.4.1 Secuencia de experimentos de deflexión y polarización

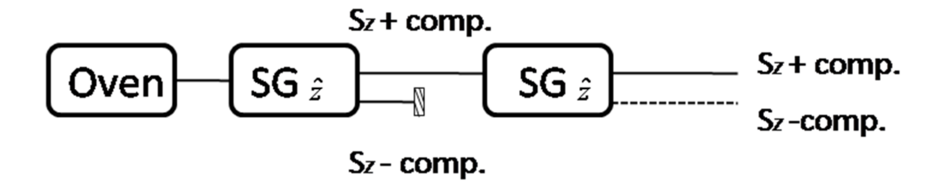
Espín electrónico

El resultado de cualquier medida del momentum angular intrínseco del electrón, no importa lo que hagamos, es como ya se dijo +½ o –½, en las unidades que se convino utilizar. Recuérdese: lo que permite medir el aparato de Stern-Gerlach (SG) es la componente del momentum angular de espín en la dirección de un campo magnético inhomogéneo producido por unos imanes; se escoge que los imanes y el campo vayan en la dirección perpendicular a la dirección de propagación del haz: para ello basta orientar el gradiente del campo que generan los imanes en la dirección que se desee; ese gradiente o inhomogeneidad de la componente del campo ocasiona, desde el punto de vista clásico, una fuerza deflectora. Marquemos el eje de propagación del haz con la dirección y. La dirección de inhomogeneidad del campo coincide con la orientación del campo de los imanes utilizados en el experimento, esquematizado en la figura 3.11. Puede ser z o x, dependiendo de la dirección en que se oriente el SG. Escribiremos $(SG)_z$ o $(SG)_x$ según el caso.

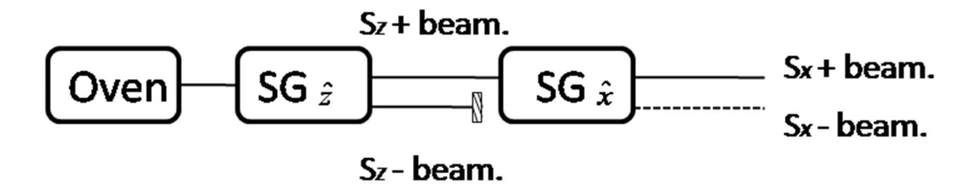
Precisemos la nomenclatura: denominemos por **S** el valor del momentum angular intrínseco del electrón (es un vector) y S_{z+} o S_{z-} (S_{x+} o S_{x-} respectivamente) los valores posibles que tome su componente z (o x). (La componente S_y no puede observarse en este experimento.) Así, podremos incluso hacer combinaciones y sobre todo mediciones sucesivas. Eso es lo que se hará; empecemos. De acuerdo con los resultados del experimento que acabamos de describir, tendremos; $S_{x+} = S_{z+} = +½$; $S_{x-} = S_{z-} = –½$.

En un primer experimento, supóngase que se selecciona uno de los dos haces en que se divide el haz inicial, digamos el haz de electrones con el valor de espín en la dirección z^+, es decir el valor de espín de los electrones que conforman el haz seleccionado es ½ en dirección z positiva. Si ese haz *puro* lo obligamos a pasar por un segundo SG orientado en la dirección z^+, no debería ocurrir nada extraño: el valor que se determine será nuevamente +½. Ese es ciertamente el resultado, esquematizado en la figura 3.12a.

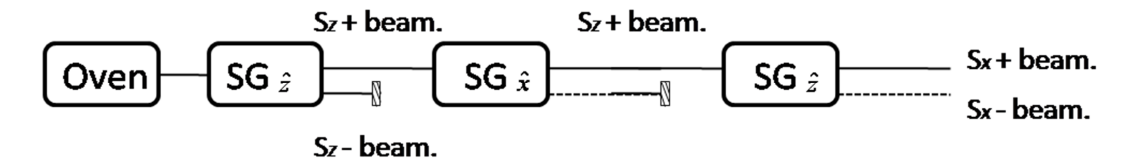
¿Qué ocurrirá si en vez de orientar el segundo SG en dirección z^+ lo orientamos en dirección x^+? El resultado es sencillo, pero *sorprendente*: el haz se separa en dos nuevos haces, iguales en intensidad, con valores de espín +½ y –½, pero esta vez en dirección x, positiva y negativa; en otras palabras, el haz original S_{z+} se ha convertido en dos haces S_{x+} y S_{x-}, con igual intensidad. El esquema se muestra en la figura 3.12b. Si tomáramos un tercer SG para medir el valor de espín de cualquiera de los dos haces resultantes, comprobamos que los electrones de cada uno de los haces tienen el valor de espín que esperamos: +½ y –½. La figura 3.12c resume el resultado.



a) Primera Secuencia



b) Segunda Secuencia



c) Tercera Secuencia

Figura 3.12. Secuencias de experimentos de Stern-Gerlach (SG). La imagen es esencialmente la misma utilizada en el clásico texto de Sakurai.

Hasta aquí el lector no tendrá mayor problema: supondrá que, así como hay una componente de espín en dirección *z*, habrá una componente de espín en dirección *x*. Ya se ha dicho que el valor va a ser +½ o –½ siempre, por lo que podrá concluir que ahora la descripción de los haces resultantes es la siguiente: para el primero, los electrones tienen tanto una componente $S_{z+} = +½$ como una componente $S_{x+} = +½$; para el segundo, $S_{z+} = +½$ y $S_{x-} = –½$. Esta hipótesis, plausible, puede comprobarse o negarse con un tercer experimento para el cual nuestro tercer SG se orienta en dirección *z*. **El resultado es negativo**, como indica la figura 3.12d: en la dirección *z* obtenemos otra vez dos haces de igual intensidad, uno con S_{z+} y otro con S_{z-}, como si al electrón se le hubiera olvidado la preparación que se le hizo de un estado puro S_z en el primer SG antes de hacerlo pasar por el segundo SG.

Examinemos esto con mayor detalle. En física lo que estamos haciendo se denomina *colimar* o seleccionar partículas, y consiste en la preparación de haces o racimos de partículas con las mismas propiedades iniciales. Cuando salen del *horno*, los electrones salen *aleatoriamente*, con las orientaciones de sus dipolos magnéticos intrínsecos completamente al azar. El primer SG nos separa los electrones que tienen espín S_{z+} de los que tienen espín S_{z-}. El segundo SG nos permite separar los electrones que tienen espín S_{x+} de los que tienen espín S_{x-}; hasta ahora se ha asumido que las medidas en *z* y en *x* son independientes. Si esta suposición es correcta, cuando regresemos a observar la componente S_z la debemos encontrar en el valor anterior. Pues bien, no es así.

El resultado del experimento anterior plantea algunos interrogantes. Una forma sencilla de responderse a la mayor inquietud consiste en reconocer que la fuerza ejercida por el campo

magnético sobre el momento magnético (digamos más bien que la interacción entre el campo magnético del SG y el momento de dipolo magnético del electrón) lo modifica a tal punto que la preparación previa se echa a perder. En realidad, lo único que se puede afirmar es que en el segundo experimento se han preparado las condiciones para observar componentes de espín en la dirección *x* positiva o negativa. El resultado de la observación deja a las partículas observadas en un estado de espín determinado, sea este S_{x+} o S_{x-}. Eso significa, de paso, que cuando queramos determinar la componente S_z el sistema ha olvidado por completo su estado anterior. Estamos en presencia de dos observables no compatibles, para los cuales vale el principio de indeterminación.

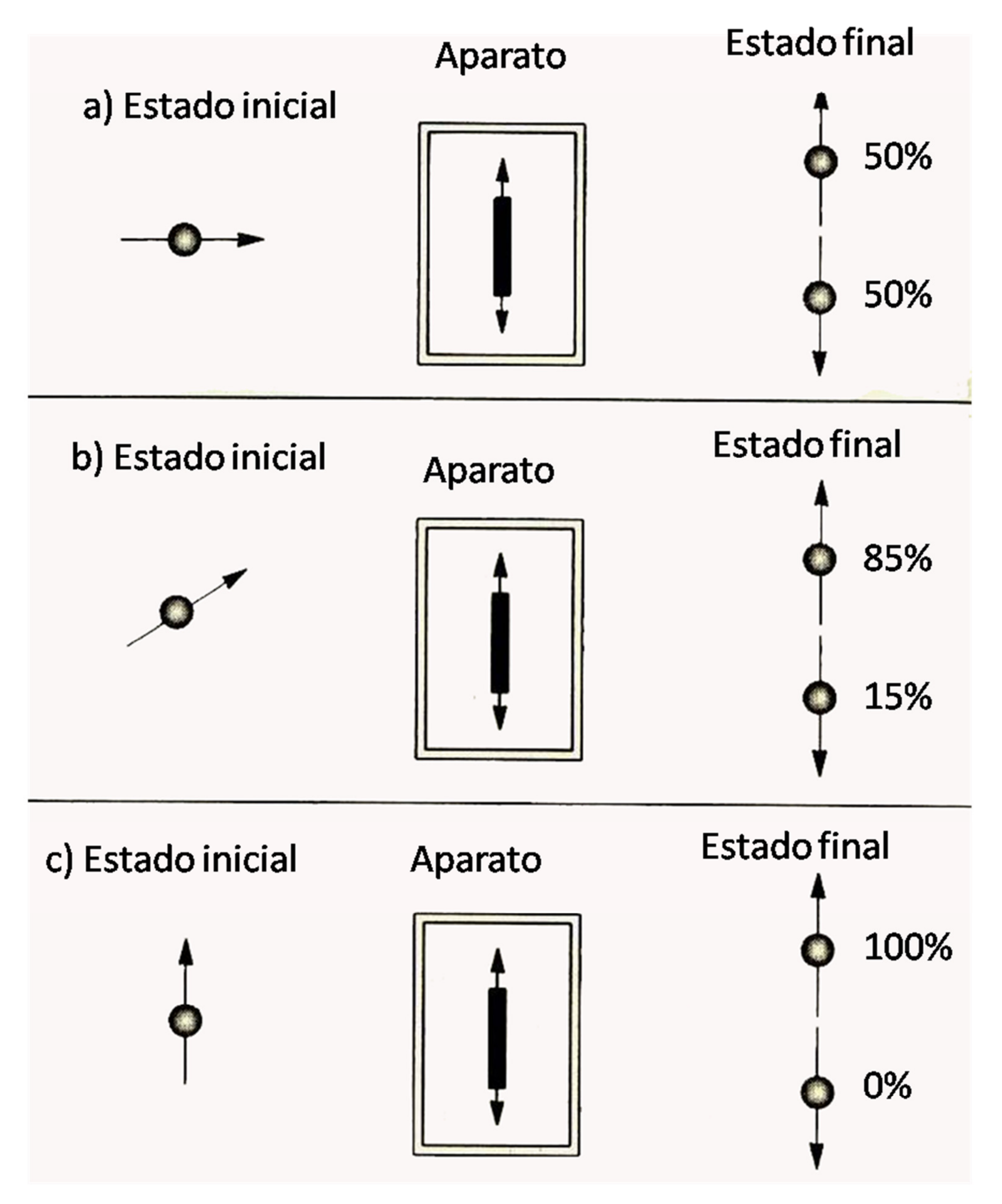


Figura 3.13. Aparato Stern-Gerlach vertical *fijo* que examina electrones preparados inicialmente en distintos estados de espín. a) Preparación inicial con espín horizontal. b) Preparación inicial con espín oblicuo. c) Preparación inicial con espín vertical.

Para resumir y sacar conclusiones, examínese la siguiente situación en la que participa un solo electrón, ilustrada en la figura 3.13. Hágase abstracción del movimiento del electrón y considérese solamente el valor del espín. Supóngase que en un experimento previo se ha determinado que éste apunta en dirección horizontal positiva, +½ (figura 3.13a). Cuando se le mida su espín con un aparato que detecta la proyección del espín en dirección vertical, del resultado del experimento anterior es claro que el resultado tiene que ser, con igual probabilidad, +½ o –½ en dirección vertical, no cero, como diría la expectativa clásica. En otras palabras, después de analizar un gran número de situaciones con la misma condición inicial (espín en dirección horizontal +½), el aparato de detección vertical de espín ha registrado 50 % hacia arriba y 50 % hacia abajo. Ahora bien, nada impide orientar el aparato un ángulo de por ejemplo 45º con respecto a la orientación inicial del espín. La situación se ilustra en la figura 3.13B. Los cálculos cuánticos dirán, y los experimentos confirmarán, que aproximadamente 85 % de las veces se obtendrá +½ y 15 % de las veces –½ en dirección vertical. Por último, supóngase que la orientación del aparato coincide con la del espín, como ilustra la figura 3.13c. En este caso, se obtendrá con toda seguridad el valor +½.

Como conclusión de los dos casos anteriormente examinados, puede afirmarse que: no es posible, a partir de una sola medida, saber con precisión cuál era el estado previo del electrón; qué resultado se obtendrá, es algo que solo puede predecirse con cierto grado de probabilidad; hay solo un caso en que es posible predecir el valor exacto de la medición: si la orientación del espín coincide con o es opuesta a la del aparato y en una medida mediante un experimento previo se ha determinado que esa era la dirección del espín; por otra parte, si al medir nos da todas las veces (100 %) una cierta dirección para el espín, concluimos que antes de la medida ese era el estado de espín del electrón.

3.7 De vuelta al gran misterio

Resumo a continuación el capítulo de Feynman al que ya aludí, histórico por su sencillez y por la profundidad del contenido. El tema, aparentemente expuesto minuciosamente por primera vez en sus famosas «Lectures on physics», es la magistral ilustración de la diferencia radical entre 'los dos mundos', clásico y cuántico. Cuando lo presentó en 1961, seguramente era solo un *experimento pensado*. Dejó de serlo poco después. Hoy en día el experimento se hace, con restricciones, en un buen laboratorio de física. En la revista *Investigación y Ciencia* ya referido sugieren cómo hacerlo en casa. La conferencia de Feynman se denomina *Comportamiento cuántico* y corresponde al No. 37 del primer tomo de las "lecturas". Igualmente se recomienda al lector el resumen que de dicha conferencia presenta Gribbin en su famoso libro sobre *el gato de Schrödinger*.

3.5.1 Introducción al mundo cuántico

Nos dice Feynman: "La «mecánica cuántica» es la descripción del comportamiento de la materia en todos sus detalles y, en particular, de lo que sucede a escala atómica. Las cosas a una escala muy pequeña no se comportan como nada de lo que ustedes tengan experiencia directa. No se comportan como ondas, no se comportan como partículas, no se comportan como nubes, o como bolas de billar, o como pesos colgados de muelles, o como nada que ustedes hayan visto alguna vez". Después de examinar lo que se pensaba sobre la luz, partículas en el siglo XVII, ondas durante los siglos XVIII y XIX, nuevamente partículas desde 1905; de recordarnos que el electrón, partícula descubierta por Thomson padre, con propiedades ondulatorias en ocasiones, como lo

comprobó, entre otros, Thomson hijo, agrega: “Hay, no obstante, una feliz circunstancia: los electrones se comportan exactamente igual que la luz. (Subrayado por mí.) El comportamiento cuántico de los objetos atómicos (electrones, protones, neutrones, fotones y demás) es el mismo para todos; todos son «partículas-ondas», o como quiera que ustedes prefieran llamarlos. (A mis estudiantes les suelo decir: *partondas* u *ondículas*, como lo prefieran.) Así que lo que aprendamos sobre las propiedades de los electrones (que utilizaremos como ejemplo) se aplicará también a todas las «partículas», incluyendo los fotones en la luz”.

Los experimentos que propone a continuación establecen claramente la diferencia entre el comportamiento de corpúsculos y de ondas en la fenomenología clásica. Veámoslo, en forma resumida, ligeramente modificada. Para mayores detalles, se aconseja ir a la fuente original.

3.5.2 Un experimento con balas

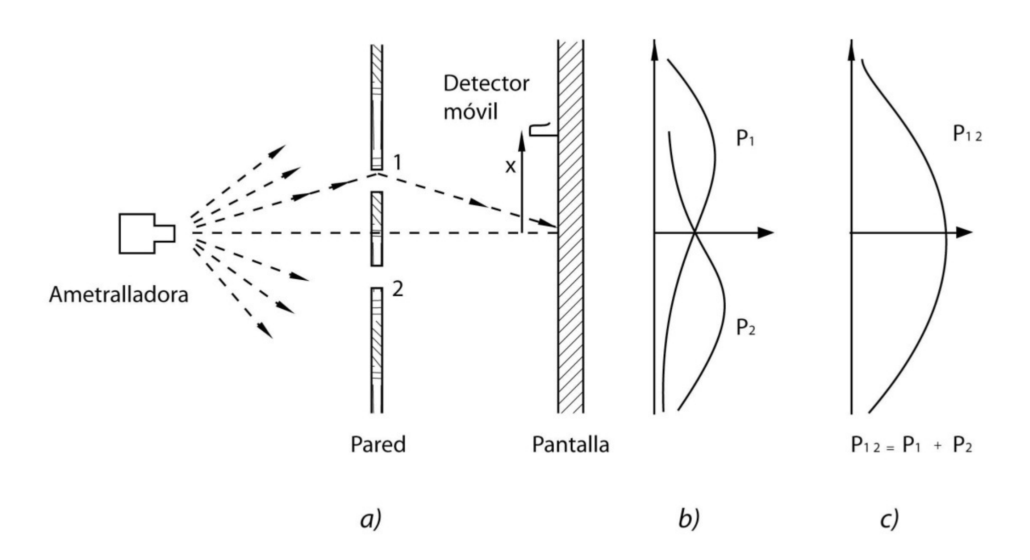


Figura 3.14. Reproducción del experimento con balas propuesto por Feynman.

Para facilitar el relato de este experimento pensado, se me ocurre hacer referencia a los perdigones que utilizaban las escopetas de cacería antiguas, más bien que a las balas de una ametralladora. La dispersión de esas municiones de forma esférica era enorme. Imaginemos, pues, una lluvia continua de perdigones, supuestamente indestructibles para poder comparar posteriormente con la *lluvia de electrones* que salen de un metal al calentarlo. En frente, como muestra la figura, hay una pared. Conviene imaginar que el cañón de la escopeta no está firme y los proyectiles salen en cualquier dirección hacia adelante. En frente hay un par de agujeros, los únicos espacios por donde pueden atravesar las balas. La forma de los agujeros, por extraño que parezca, no importa mucho, pero sí su tamaño. Esto es particularmente cierto en el caso del *cañón de electrones* (figura 3.16). En la primera parte del experimento con balas se cubre el agujero inferior; la distribución estadística de los perdigones es más o menos como la que se muestra en la parte superior de la figura 3.14b; si, por el contrario, se impide el paso por el

agujero superior, lo que se observa es la distribución de la parte inferior, reflejo especular fiel de la anterior.

Vamos a repetir el experimento con los dos agujeros abiertos. El resultado depende de la separación entre los agujeros. Supongamos que esta separación es pequeña, suficiente como para que los dos máximos de cada agujero por separado se puedan superponer dando lugar a un máximo en el centro; si la separación fuera muy grande, los dos máximos al superponerse darían lugar a dos máximos separados. Cito a Feynman, para las condiciones consideradas en su conferencia: "Las probabilidades simplemente se suman. El efecto cuando ambos agujeros están abiertos es la suma de los efectos con cada agujero abierto por separado. Llamaremos a este resultado una observación de *«ausencia de interferencia»,* por una razón que verán más adelante. Hasta aquí lo relativo a las balas. Ellas llegan en porciones, y su probabilidad de llegada no muestra interferencia".

3.5.3 Un experimento con ondas

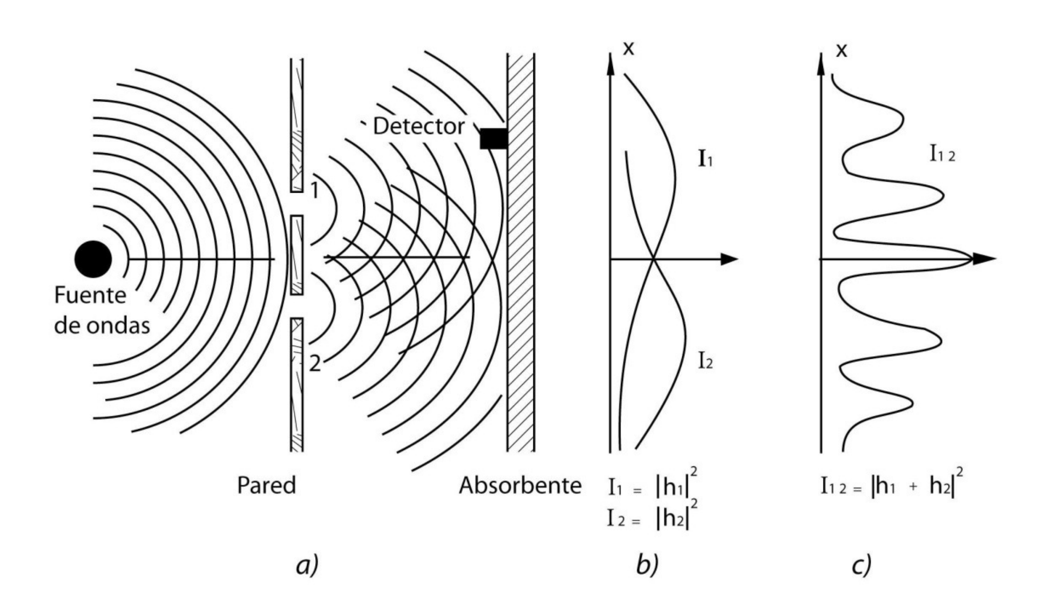


Figura 3.15. Esquema del experimento con ondas en un cubilete de agua.

Imaginar u observar lo que ocurre con ondas es muy simple, si se recurre como ejemplo a ondas en un cubilete de agua. El experimento ha sido discutido en la sección 2.6. El recipiente puede ser, para efectos prácticos, un molde rectangular que termina suavemente en los bordes, para evitar reflexiones indeseables. Como «fuente de ondas» puede usarse una barra plana que se hace oscilar en forma armónica verticalmente por medio de un motor, produciendo ondas planas; o para comparar más fácilmente con el experimento de las balas, una punta que produce ondas circulares a cierta frecuencia. A la derecha de la fuente tenemos de nuevo un obstáculo con dos 'agujeros', más bien ranuras verticales. Cada ranura actúa como una fuente de ondas de agua circulares. Esta vez, más que la distribución de probabilidad, nos interesa la intensidad de la onda; la intensidad de una onda es proporcional al cuadrado de la amplitud, o perturbación máxima,

para el caso la altura de la columna de agua a partir del nivel de referencia o superficie horizontal. Sorprenderá al lector que el resultado de este experimento, realizado de acuerdo con el montaje de la figura 3.15, sea el mismo que el de la figura 2.9. Para su tranquilidad, examine de nuevo la figura 2.10 y compare resultados. La conclusión a que debe llegar es que lo único importante cuando se trata de ondas es el hecho de que haya dos fuentes sincronizadas, sean primarias, como en 2.9, o secundarias, como en 2.10.

Sin entrar en detalles, en todos los casos el resultado es como el que se muestra en la figura 3.15, si la ranura es menor que la longitud de onda de la onda generada, o si la fuente (caso de la figura 2.9) se puede considerar pequeña comparada con su longitud de onda. De nuevo, si una de los ranuras se obstruye (una de las fuentes, en 2.9), la intensidad de la onda resultante se va desvaneciendo hacia los lados. Pero si las dos ranuras permiten el paso de las ondas simultáneamente, se presenta un fenómeno característico de las ondas: ¡habrá interferencias, constructivas y destructivas!

Para mayor claridad, se sugiere mirar con atención la figura 2.10, donde se ilustran los resultados con ondas de luz; en los dos casos, ondas de luz y ondas de agua, se ha supuesto que la distancia entre las ranuras, caso de la luz, o entre las fuentes primarias, ondas de agua, es comparable a la longitud de onda. En cada caso, la intensidad resultante se puede escribir como

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\,(I_1 I_2)^{1/2} \cos \delta.$$

El ultimo término se suele llamar *término de interferencia*, y δ es la diferencia de fase con que llegan las dos señales desde los dos agujeros: en el centro, la diferencia es nula, de ahí el *máximo de interferencia* que se observa. Observe que Cos δ toma todos los valores posibles entre -1 y +1, como corresponde a las funciones seno y coseno.

3.5.4 Un experimento con electrones

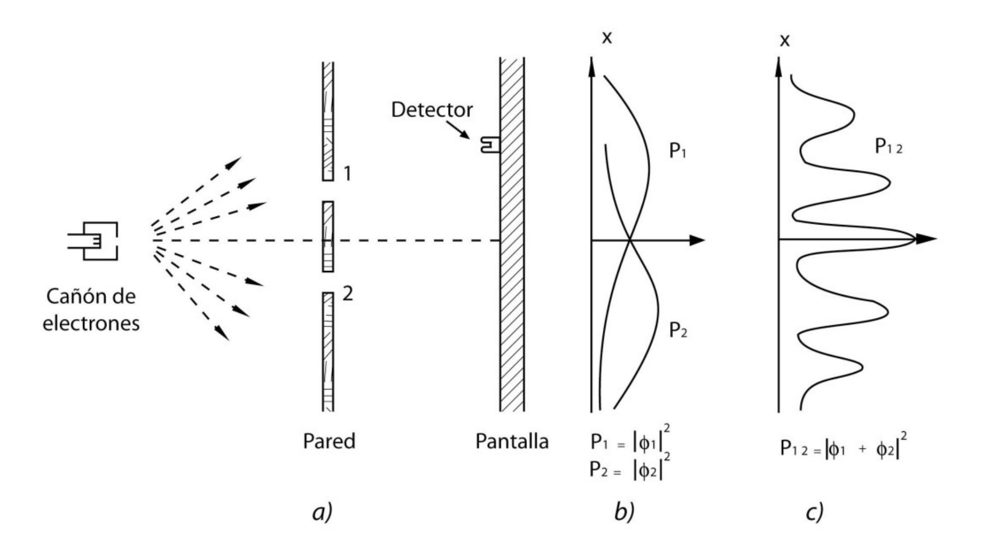


Figura 3.16. Experimento con electrones (reproducción del texto de Feynman).

Tomemos textualmente de Feynman: "Imaginemos ahora un experimento similar con electrones. Se muestra esquemáticamente en la figura 3.16. Tenemos un cañón de electrones que consiste en un filamento de tungsteno calentado mediante una corriente eléctrica, rodeado por una caja metálica con un agujero. Si el filamento está a un voltaje negativo con respecto a la caja, los electrones emitidos por el filamento serán acelerados hacia las paredes y algunos pasarán a través del agujero. Todos los electrones que salgan del cañón tendrán (aproximadamente) la misma energía. Frente al cañón hay de nuevo una pared (simplemente una placa metálica delgada) con dos agujeros. Detrás de la pared hay otra placa que servirá de «pantalla». Delante de la pantalla colocamos un detector móvil. El detector podría ser un contador geiger o, quizá mejor, un multiplicador electrónico, que está conectado a un altavoz."

Para la fecha en que Feynman elaboró su conferencia, probablemente este experimento no se había realizado, pero sí otros equivalentes (recuérdese, no obstante, lo dicho sobre el experimento de Jönssen); lo más interesante es que, a pesar de ser entonces un *experimento pensado*, nadie tuviera duda alguna sobre el resultado. Un experimento como éste, con las adecuaciones apropiadas, se ha realizado múltiples veces desde entonces. El resultado es siempre el mismo: los electrones, cuando pasan simultáneamente por los dos agujeros, ¡dan señales de interferencia!

Innecesario (¿?) decir que cuando los electrones pasan solamente por un agujero se comportan como los proyectiles del primer experimento. La distribución de probabilidades para uno u otro agujero es la misma y sigue la distribución de corpúsculos «normales». Pero cuando pasan simultáneamente por los dos, sin que sepamos por cuál de los agujeros pasó cada electrón, la distribución de probabilidades no es la suma de probabilidades: $P_{12} \neq P_1 + P_2$. En algunos puntos el resultado es prácticamente cero; en algunos puntos el resultado es mayor que la suma de los dos por separado, algo en verdad sorprendente. Efectivamente, ¡hay un término de interferencia! En lenguaje matemático, todo el misterio desaparece cuando se recurre al término de interferencia de la expresión de intensidades para ondas.

Dice Feynman: "Creemos entender lo que pasa con las ondas: el frente de ondas se divide, de tal manera que una parte atraviesa la ranura 1 y otra atraviesa la ranura 2. ¿Estará pasando lo mismo con los electrones? La respuesta es ¡no! Los electrones atraviesan enteros, no se dividen en una parte que va por la ranura 1 y otra que va por la ranura 2. Lo único que se está haciendo, desde el punto de vista de la observación de los electrones, es detectar los electrones cuando llegan a la pared. No hemos seguido sus trayectorias. Intentemos hacerlo".

3.5.5 Observando las partículas

Feynman describe un experimento pensado, mediante el cual podemos observar el paso de los electrones. Tal vez para el caso de los electrones la propuesta de Feynman es difícil de realizar, aunque se pueden hacer modificaciones que materialicen dicho experimento mediante «transistores de un solo electrón», como los que se describen en el capítulo séptimo de *Nanotecnociencia*. Podríamos recurrir, para simplificar las cosas, a un experimento con átomos: haciendo pasar átomos en vez de electrones, el resultado es esencialmente el mismo: ¡hay

interferencia cuando no se observa el paso de ellos! Con fotones, el experimento es sencillo de hacer, como sugieren en el artículo ya citado de Hillmer y Kwiat.

¿Qué ocurre cuando se *espía* el paso de electrones o de átomos a través de las ranuras, de tal manera que podemos decir por dónde pasa cada uno de ellos? El espionaje se puede hacer colocando una fuente de luz, imagínensela muy tenue, entre la placa que contiene los agujeros por donde cruzan y la placa o pared donde se detectan. Los átomos, con mayor facilidad que los electrones, dispersan la luz de la fuente luminosa, permitiendo determinar por dónde pasó cada uno de ellos. ¡El misterio desaparece! Los electrones o los átomos se comportan ahora como los proyectiles del primer experimento: en otras palabras, mediante la observación ¡se ha destruido el patrón de interferencia! El resultado se muestra en la figura 3.17.

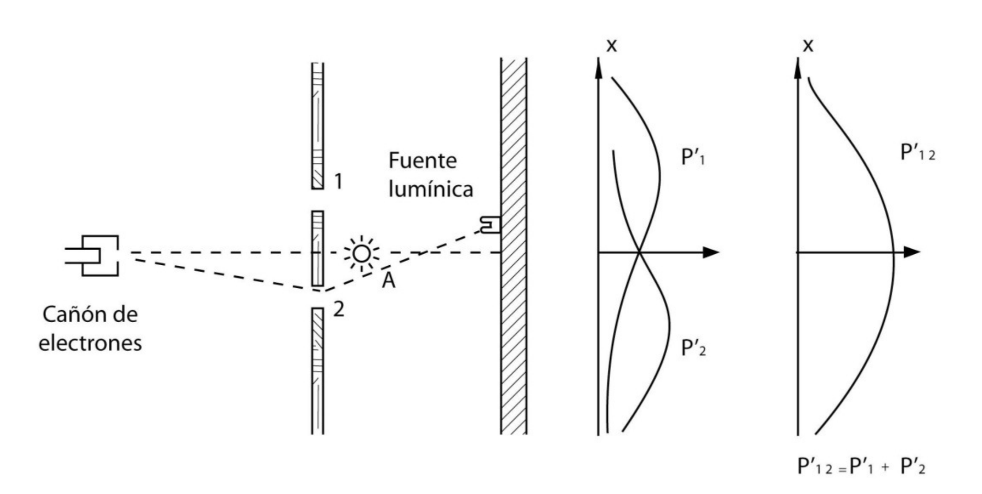


Figura 3.17. Observando (espiando) el paso de los electrones.

Los electrones (también los átomos) son muy *sensibles* y alteran sus trayectorias cuando se observan, lo que no ocurre con las balas. ¿Qué ocurre si se disminuye la intensidad de nuestra fuente de luz todavía más, gradualmente? Puede suceder que algunos de los electrones o átomos no sean *observados* al cruzar: nos hemos quedado sin saber por dónde pasaron, solamente supimos, por el detector en la pantalla, que llegaron a ésta. Para las partículas que no pudieron ser observadas, el resultado es el mismo que para el de la figura 3.16: exhiben un *patrón de interferencia*, como las ondas.

Los argumentos de Feynman nos llevan a descartar *teorías extrañas* sobre el comportamiento de los electrones cuando los observamos. No hay electrones que se dividan; tampoco los hay que puedan pasar a través de ambos agujeros. "Cuando los observamos, los electrones atraviesan (los agujeros) simplemente como esperaríamos que los atravesasen. Ya estén los agujeros abiertos o cerrados, aquellos electrones que vemos pasar a través del agujero 1 se distribuyen de la misma forma independientemente de que el agujero 2 esté abierto o cerrado.

¿No hay *alguna* forma de que podamos ver los electrones sin perturbarlos? Aprendimos en un capítulo anterior que el momento transportado por un «fotón» es inversamente proporcional a su

longitud de onda *($p = h/\lambda$)*. Ciertamente el empujón dado al electrón cuando el fotón es dispersado hacia nuestros ojos depende del momento que transporta el fotón. ¡Ajá! Si sólo queríamos perturbar ligeramente a los electrones no deberíamos haber disminuido la *intensidad* de la luz, sino que deberíamos haber disminuido su *frecuencia* (que es lo mismo que incrementar su longitud de onda). Utilicemos luz de un color más rojo. Podríamos entonces utilizar luz infrarroja, o radio ondas (como el radar), y «ver» dónde fue el electrón con ayuda de algún equipo que pueda «ver» luz de estas longitudes de onda más largas. Si utilizamos luz «más suave» quizá podamos evitar el perturbar tanto a los electrones. Intentemos el experimento con ondas más largas. Seguiremos repitiendo nuestro experimento cada vez con luz de una mayor longitud de onda. Al principio, parece que nada cambia. Los resultados son los mismos. Luego sucede algo terrible. Recordarán ustedes que cuando discutimos el microscopio señalamos que, debido a la *naturaleza ondulatoria* de la luz, hay una limitación a lo próximos que dos puntos pueden estar y seguir viéndose como dos puntos separados. Esta distancia es del orden de la longitud de onda de la luz. Por ello, ahora, al hacer la longitud de onda más larga que la distancia entre nuestros agujeros, vemos un *gran* destello borroso cuando la luz es dispersada por los electrones. ¡Ya no podemos decir por qué agujero pasó el electrón! ¡Simplemente sabemos que fue a alguna parte! Y es solamente con luz de este color cuando encontramos que los empujones dados a los electrones son suficientemente pequeños para que P'_{12} empiece a parecerse a P'_{12}, que empezamos a obtener algún efecto de interferencia. Y es sólo con longitudes de onda mucho más largas que la separación de los dos agujeros (cuando no tenemos ninguna posibilidad de decir dónde fue el electrón) cuando la perturbación debida a la luz se hace suficientemente pequeña para que obtengamos de nuevo la curva P_{12} mostrada en la figura 6.3."

3.6 Conclusión: comportamiento dual de la materia

Recordemos ahora lo que ya sabemos acerca de la luz: aunque nos la imaginábamos como una onda, en realidad está compuesta de *corpúsculos* o *granos de luz*, cuantos de luz denominados *fotones*. Como se mencionó en el capítulo octavo, hoy en día es posible controlar el flujo de fotones, para poder *manipular* fotones individuales. En el experimento de detección mediante luz, podríamos imaginar que utilizamos fotones individuales: en tal caso, habrá circunstancias afortunadas en que el fotón y el electrón (o átomo) *se crucen*: habrá, pues, dispersión de un fotón por una partícula. Si eso ocurre, la partícula habrá sido «observada»: su comportamiento es *como de partícula*. Caso contrario, su comportamiento es *como de onda*.

El experimento con electrones o con átomos se puede realizar con sumo cuidado: enviando, por ejemplo, un electrón o un átomo cada vez; con la periodicidad que se desee: digamos que uno cada cierto número de segundos, o de minutos, de tal suerte que el anterior ya fue detectado cuando el siguiente se envió; es decir, podemos estar seguros de que no hay una interferencia *directa* entre la trayectoria del uno y el siguiente. Lo mismo puede hacerse, en principio, en un experimento con luz. Los resultados serán esencialmente los mismos. Esto quiere decir que si se presenta una interferencia, es la *inteferencia del electrón consigo mismo*.

Cuando se hable de la descripción del electrón mediante una función de onda apropiada, se concluirá que la función de onda lleva la siguiente información: nos da la probabilidad de que el

electrón se deposite en uno u otro lugar sobre la pantalla; la distribución de probabilidad es lo que se ha representado en las figuras 3.14 y 3.16. Se volverá a la discusión del significado de esta afirmación en el capítulo cuarto.

La difracción de rayos X abrió un campo extraordinariamente rico al estudio de los sólidos cristalinos. El experimento es muy fácil de entender cualitativamente: basta considerar planos cristalinos adyacentes a los que llega una onda plana de rayos X, como ilustra la figura 3.18. Hay interferencia constructiva, en este caso una 'reflexión' o 'dispersión' coherente, cuando el ángulo ϑ que forma el rayo incidente con el plano cristalino es tal que para una separación d entre planos cristalinos adyacentes se cumple la relación

$$2d \text{ sen } \vartheta = n\lambda.$$

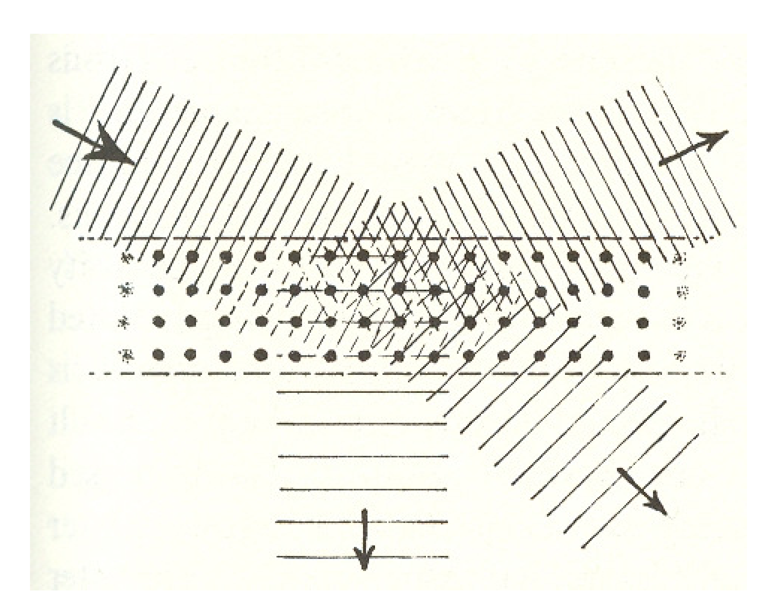


Figura 3.18. Esquema de la difracción de rayos X por un enrejado cristalino.

Aquí λ es la longitud de onda de los rayos X empleados, con longitudes en la región de unos pocos ångströms, y n el orden de interferencia. Su pequeña longitud de onda garantiza que la relación anterior pueda satisfacerse para n pequeño: $n = 1, 2$, etc.

El experimento puede ser realizado con igual éxito *difractando* electrones. Los espectros que se obtienen son muy similares. El resultado comparativo de los dos experimentos se muestra en la figura 3.9.

En conclusión:

1. Los componentes elementales del Universo, partículas elementales y partículas mediadoras, exhiben características de corpúsculo y de onda.
2. Los agregados de partículas, sean estos quarks, núcleos, átomos o moléculas, presentan comportamiento ondulatorio y corpuscular.

3. Esta dualidad onda-corpúsculo no se puede poner de manifiesto en un mismo experimento: o preparamos mediciones mediante aparatos para observar o poner en evidencia una naturaleza o la otra. Ambos caracteres son complementarios.
4. Es imposible saber cómo se está comportando un sistema cuántico a menos que lo observemos; pero el proceso de observación lo altera en una forma que no podemos anticipar.
5. Mientras no lo observemos, un sistema evoluciona *normalmente*, en una forma prevista por un ente matemático que nos permite hacer predicciones.

Sobre el ente matemático que nos permite hacer predicciones hablaremos en el siguiente capítulo.

Hay algo maravilloso en todo este proceso experimental que hemos estado analizando a lo largo de este capítulo: la última palabra la tiene el experimento. La mejor ciencia que podemos construir es aquella que nos permite hacer predicciones en concordancia con los experimentos. Lo demás es especulación. Pero hay una confianza plena en los resultados cuando los fundamentos son firmes. El caso más destacado en la historia de la ciencia reciente, la del siglo XX, lo constituye precisamente el experimento de interferencia de electrones a través de dos ranuras. Hacerlo en el laboratorio tomó más de tres décadas, pero los resultados eran completamente previsibles.

El experimento de difracción de rayos X ocurre en un arreglo cristalino en donde la separación entre los átomos es una fracción de nanómetro. Cuando se hicieron los experimentos de difracción de electrones primero y luego de átomos, las condiciones fueron las mismas. El experimento de las dos rendijas es otra cosa.

Como hemos insistido desde el comienzo del capítulo, los resultados del experimento de las dos rendijas es conocido prácticamente por todos los que se han acercado al más elemental curso de física moderna, así no lo hayan tomado. Con razón fue escogido como *el experimento más bello en la historia de la física*, una ciencia experimental por excelencia, teórico-experimental para ser precisos, la prueba está en que nadie dudaba del resultado cuando el experimento pudiera materializarse. El experimento lo realizó, no lo olvide, amigo lector, Claus Jönssen en la Universidad de Tubinga, Alemania, en 1961, cuando ya el experimento *había sido inmortalizado*. Publicado, al igual que los 5 trabajos de Einstein que lo inmortalizaron en aquel memorable 1905, en *Zeitschrift für Physik*, a diferencia de los de este último, el reporte sobre el experimento pasó desapercibido para la comunidad científica universal por más de una década. Posteriormente fue publicado en una revista de carácter pedagógico. Como un homenaje tardío al pionero en la realización de este hasta hace relativamente poco dificilísimo experimento, quisiéramos denominarlo como se lo merece: ***El experimento de Jönssen****, el más bello en la historia de la física hasta la fecha*.

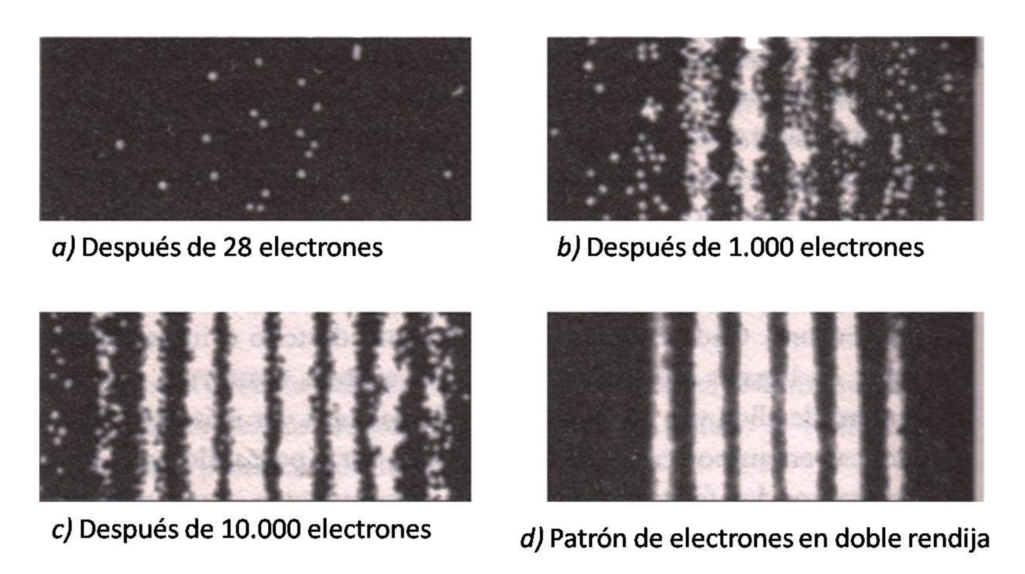


Figura 3.19 Experimento de Jönssen: un experimento real de interferencia de electrones a través de dos ranuras.

Para terminar este capítulo, quise agregar una imagen del experimento hecho con biomoléculas de tetrafenilporfirina, reproducido en el artículo de revisión de Markus Arndt, Thomas Juffmann y Vlatko Vedral sobre lo que yo denomino *Biología cuántica*. Su artículo se denomina *Quantum physics meets biology* (HFSP Journal 3:6, 386), y está disponible en pdf (http://arxiv.org/pdf/0911.0155v1.pdf).

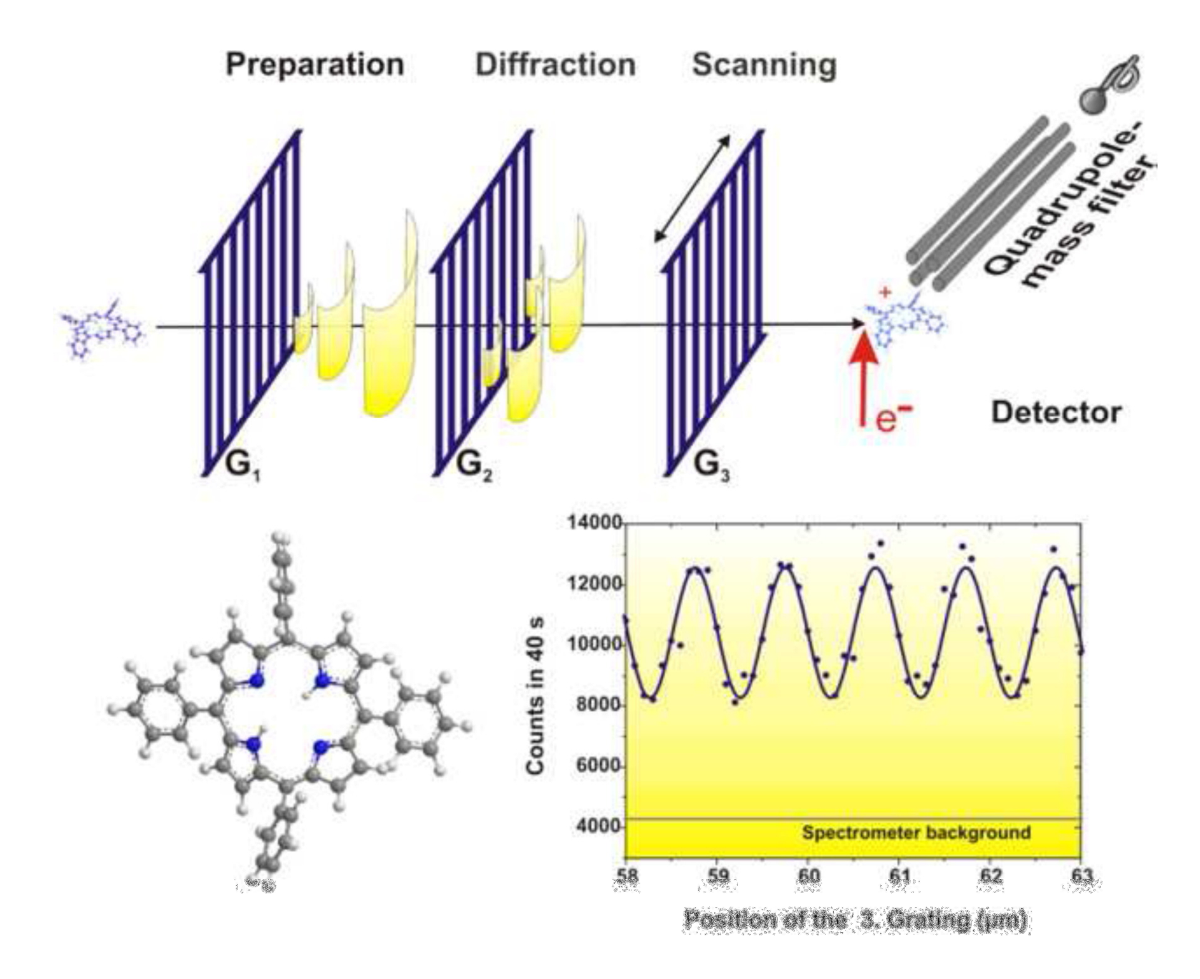


Figure 2: The wave-particle duality of the biodye tetraphenylporphyrin can be revealed by diffracting the molecules in a near-field interferometer of the Talbot-Lau type (Hackerm¨uller et al., 2003). Molecules passing the first grating are diffracted and delocalized over several micrometers at the second grating. Diffraction there leads to interference fringes, i.e. a molecular density pattern, at the position of the third mask. This is imaged by scanning grating G3 and by recording all transmitted molecules in a mass spectrometer.